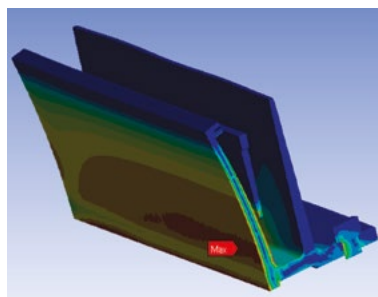
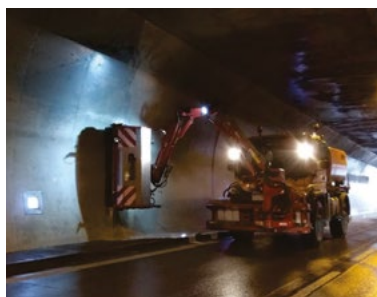
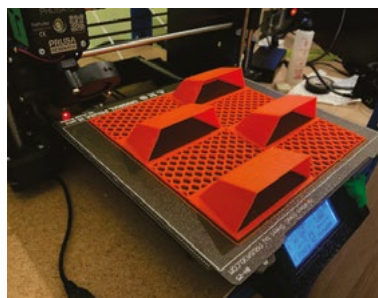


JUNIORSTAV 2021

23. ODBORNÁ KONFERENCE DOKTORSKÉHO STUDIA
23RD INTERNATIONAL CONFERENCE OF DOCTORAL STUDENTS

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ PROCEEDINGS



JUNIORSTAV 2021

23. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí
23rd International Conference of Doctoral Students

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ PROCEEDINGS

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering

28. 1. 2021

ISBN sborníku příspěvků: 978-80-86433-75-2
ISBN of Proceedings: 978-80-86433-75-2

GARANT KONFERENCE

SUPERVISOR OF THE CONFERENCE

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc., děkan Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně

prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc., proděkan pro tvůrčí činnost

Ing. Eva Šuhajdová, garant konference JUNIORSTAV

ORGANIZAČNÍ TÝM KONFERENCE

ORGANIZING COMMITTEE

Ing. Eva Šuhajdová

Ing. Kristýna Velikovská

Ing. Jana Nováková

Ing. Světlana Moravčíková

Ing. Michal Kuruc, Ph.D.

Ing. Jakub Nosek

ODBORNÍ GARANTI SEKČÍ KONFERENCE **ACADEMIC CONFERENCE SECTION SUPERVISORS**

Ing. arch. Adam Guzdek, Ph.D.	prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.
prof. Ing. Miloslav Novotný, CSc.	Ing. Michal Křiška Dunajský, Ph.D.
Ing. Martin Mohapl, Ph.D.	prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA
doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D.	doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.
doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Ing. Jiří Strnad, Ph.D.	doc. Ing. Jana Korytářová, Ph.D.
prof. Ing. Jindřich Melcher, DrSc.	doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.
Ing. Věra Glisníková, CSc.	prof. Ing. Jiří Hirš, CSc.
doc. Ing. Michal Stehlík, Ph.D.	doc. Ing. Milan Ostrý, Ph.D.

GARANTI SEKČÍ KONFERENCE **CONFERENCE SECTION SUPERVISORS**

Ing. arch. Adam Guzdek, Ph.D.	Ing. Daniel Jindra
Ing. Tomáš Žajdlík	Ing. Ondřej Zedník
Ing. et Ing. Barbora Nečasová, Ph.D.	Ing. Světlana Moravčíková
Ing. Martin Všetečka, Ph.D.	Ing. Šimon Pospíšilík
Ing. Erik Dušek	Ing. Simona Ravaszová
Ing. Adam Svoboda	Ing. Zuzana Mrňová
Ing. Jan Břečka	Ing. Jakub Nosek
Ing. Kristýna Hrabovská	Ing. Dominik Cakl
Ing. Pavel Koudela	Ing. Jakub Oravec
Ing. Věra Sikorová	Ing. Jan Vystrčil
Ing. Martin Lipowczan	

ODBORNÍ RECENZENTI KONFERENCE ACADEMIC CONFERENCE SUPERVISORS

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.	doc. Ing. Jan Pavlíček, CSc.
prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.	doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.
prof. Ing. Zdeněk Kala, Ph.D.	doc. Ing. Jaroslav Raclavský, Ph.D.
prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.	doc. RNDr. Pavel Rovnaník, Ph.D.
prof. Ing. Milan Ostrý, Ph.D.	doc. Ing. Stanislav Seitl, Ph.D.
prof. Ing. arch. Jiljí Šindlar, CSc.	doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.
prof. Ing. Otakar Švábenský, CSc.	doc. Ing. Michal Stehlík, Ph.D.
prof. Ing. Miroslav Vořechovský, Ph.D.	doc. Ing. Ondřej Šíkula, Ph.D.
doc. Ing. Dalibor Bartoněk, Ph.D.	doc. Ing. Karel Šuhajda, Ph.D.
doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.	doc. Ing. Alena Tichá, Ph.D.
doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.	doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
doc. JUDr. Ing. Zdeněk Dufek, Ph.D.	doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
doc. Ing. arch. Juraj Dulenčín, Ph.D.	doc. Ing. Hanzl Vlastimil, CSc.
doc. Ing. Karel Dvořák, Ph.D.	doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.
doc. Ing. Jan Eliáš, Ph.D.	doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.
doc. Ing. Petr Frantík, Ph.D.	Ing. Ondřej Anton, Ph.D.
doc. Ing. Tomáš Hanák, Ph.D.	Ing. Jiří Apeltauer, Ph.D.
doc. Ing. Petr Hlušík, Ph.D.	Ing. Ivan Balázs, Ph.D.
doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D.	Ing. Jan Barnat, Ph.D.
doc. Ing. Vít Hromádka, Ph.D.	Ing. Renata Biela, Ph.D.
doc. Ing. Jiří Kala, Ph.D.	Ing. Jiří Boštík, Ph.D.
doc. Ing. Jana Korytářová, Ph.D.	Ing. Vít Černý, Ph.D.
doc. Ing. Tomáš Kučera, Ph.D.	Ing. Amos Dufka, Ph.D.
doc. Ing. Ivana Laníková, Ph.D.	Ing. David Duchan, Ph.D.
doc. Ing. David Lehký, Ph.D.	Ing. Petr Figala
doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.	Ing. Dominik Gazdič, Ph.D.
doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.	Ing. Martin Horáček, Ph.D.
doc. Ing. Vít Motyčka, CSc.	Ing. Eva Hyánková, Ph.D.
doc. Ing. arch. Antonín Odvárka, Ph.D.	Ing. Tomáš Julínek, Ph.D.
Ing. Radka Kantová, Ph.D.	Ing. Olga Rubinová, Ph.D.

Ing. Jan Koláček, Ph.D.

Ing. Vojtěch Kostiha, Ph.D.

Ing. Michal Křiška-Dunajský, Ph.D.

Ing. Jaromír Láník, Ph.D.

Ing. arch. Lukáš Ležatka, Ph.D.

Ing. arch. Jan Májek, Ph.D.

Ing. Jindřich Melichar, Ph.D.

Ing. Martin Mohapl, Ph.D.

Ing. et Ing. Barbora Nečasová, Ph.D.

Ing. Lenka Nevřivová, Ph.D.

Ing. arch. Tomáš Pavlovský, Ph.D.

Ing. Ondřej Pešek, Ph.D.

Ing. Milan Pilgr, Ph.D.

Ing. Marcela Počinková, Ph.D.

Ing. Jakub Raček, Ph.D.

Ing. Marie Rusinová, Ph.D.

Ing. Martin Sedlmajer, Ph.D.

Ing. Adam Svoboda

Ing. Petr Šimůnek, Ph.D.

Ing. Jiří Šlanhof, Ph.D.

Ing. Miroslav Špano, Ph.D.

Ing. et Ing. Jan Štefaňák, Ph.D.

Ing. Michal Štrba, Ph.D.

Ing. Václav Venkrbec

Ing. Eva Vítková, Ph.D.

Ing. Jiří Vondrák, Ph.D.

Ing. Jakub Vrána, Ph.D.

Ing. Miloslav Výskala, Ph.D.

Ing. Michal Žoužela, Ph.D.

**GENERAL PARTNERS | GENERÁLNÍ PARTNEŘI
KONFERENCE**

**ČESKOMORAVSKÝ
CEMENT**
HEIDELBERGCEMENT Group

Českomoravský cement, a. s.



Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě



SAINT-GOBAIN PAM CZ s.r.o.

PARTNERS | PARTNEŘI KONFERENCE



Brněnské komunikace

Brněnské komunikace, a. s.



VODÁRENSKÁ
AKCIOVÁ SPOLEČNOST, a. s.

Vodárenská akciová společnost, a.s.



ŽPSV, a.s.

PIS PECHAL, s.r.o.

PIS PECHAL, s.r.o.

MEDIA PARTNERS | MEDIÁLNÍ PARTNEŘI KONFERENCE



Časopis The Civil Engineering Journal



Časopis Czech Journal of Civil Engineering



Časopis Geodetický a kartografický obzor



Časopis Stavebnictví



TZB-info



vodárenský portál
www.vodovod.info

Vodovod.info

ÚVODNÍ SLOVO DĚKANA FAKULTY STAVEBNÍ VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.*¹

*bajer.m@fce.vutbr.cz

¹děkan Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Vážení účastníci konference JUNIORSTAV,

Jsem rád, že vás mohu přivítat na 23. ročníku této, již tradiční, konference studentů doktorského studia. Letošní rok je ale oproti minulým ročníkům přece jenom odlišný. Vzhledem ke stávající zdravotní situaci není možné pořádat konferenci v obvyklém formátu, tedy s osobní účastí. Jsem přesvědčen, že online forma konference nic neubere na její odborné úrovni a prestiži, kterou si za minulé období vybudovala. Naopak to může být příležitost k účasti i pro zahraniční studenty, kteří by se klasické konference nemohli účastnit. Věřím, že výsledky Vaší vědecké a odborné činnosti zaujmou jak Vaše kolegy doktorandy, tak další akademické a vědecké pracovníky, kteří se s nimi seznámí. Snažte se této konferenci využít k navázání vzájemných kontaktů, domluvte se na společné realizaci výzkumu a následné projektové a publikační činnosti.

Možná je tato konference jednou z prvních, kde výsledky svého výzkumu prezentujete. Je to určitě dobrá zkušenost pro Vaše další publikační aktivity na prestižních tuzemských i mezinárodních konferencích a vědeckých či odborných časopisech. Věřím, že na tuto konferenci budete v budoucnu vzpomínat jako na událost, která Vám otevřela vstup do další vědecké a odborné činnosti a pomohla Vám s nasměrováním v další vědecké práci.

Je také třeba poděkovat organizátorům této konference a recenzentům Vašich příspěvků. Zejména v dnešní nelehké době by bez nich nebylo možné tuto konferenci uspořádat.

Přeji nám všem, aby se online konference vydařila a abyste na ni i na Fakultu stavební VUT v Brně rádi vzpomínali.

ÚVODNÍ SLOVO VEDOUcíHO POŘADAJícíHO ÚSTAVU

doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.*,¹

* tuhovcak.l@fce.vutbr.cz

¹ vedoucí Ústavu vodního hospodářství obcí, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veverí 331/95, 602 00 Brno

Vážení účastníci konference, milé studentky, milí studenti,

letošní již 23. odborná konference doktorského studia JUNIORSTAV, organizovaná Fakultou stavební VUT v Brně, se koná v důsledku šíření koronaviru Covid-19 ve zcela mimořádných, bezprecedentních podmínkách, které zásadně ovlivňují nejen váš studentský život, ale život celé naší společnosti, a to nejen v naší zemi. Měli jste možnost poznat to již v uplynulých měsících nejen při svém studiu, řešení svých projektů, grantů, disertačních prací, ale i ve svém osobním a rodinném životě. Bohužel nebude možno letos naplnit jeden z hlavních cílů této konference, a sice možnost navázání přímých osobních kontaktů a setkání, možnost neformálních diskusí, výměny názorů, zkušeností i navázání nových kamarádství a přátelství nejen u nás na fakultě, ale zejména se studenty jiných vysokých škol.

Celá konference proběhne distančně, formou on-line prezentací jednotlivých příspěvků a posterů celkem v 9 tematických okruzích a 20 sekcích. Příprava letošní konference vyžadovala zcela jiný přístup při jejím organizačním zajištění. Proto bych rád poděkoval alespoň touto formou celému organizačnímu týmu pod vedením Ing. Evy Šuhajdové, doktorandkám Ústavu vodního hospodářství obcí Ing. Kristýně Velikovské, Ing. Janě Novákové a Ing. Světlaně Moravčíkové a všem dalším členům organizačního týmu za téměř roční práci, obětavost, a často nelehké rozhodování jak vlastně konferenci v podmínkách, které se v průběhu roku neustále měnily, uspořádat a zajistit. Poděkování rovněž patří všem organizačním a odborným garantům jednotlivých sekcí, recenzentům jednotlivých příspěvků, a především pak všem prezentujícím účastníkům konference. Konference JUNIORSTAV 2021 by se nemohla konat bez velkorysé pomoci celé řady partnerů a sponzorů, kteří i v těchto specifických podmínkách výrazně přispěli k jejímu úspěšnému zajištění.

I letos budou mít garanti sekcí možnost navrhnout k ocenění nejlepší prezentované příspěvky. Autorům oceněných příspěvků bude nabídnuta možnost publikovat článek v recenzovaných časopisech Civil Engineering Journal, Geodetický a kartografický obzor, Stavebnictví, Czech Journal of Civil Engineering, TZB-info a Vodovod.info. Předpokládám, že pro řadu účastníků konference, zejména z řad studentů, to bude první příležitost zúčastnit se aktivně takovéto on-line konference. Proto přeji všem prezentujícím vydařenou prezentaci jejich příspěvků a všem účastníkům získání nových poznatků, podnětů a motivace pro další odbornou a vědeckou práci.

SEKCE KONFERENCE JUNIORSTAV 2021

1. Pozemní stavitelství, architektura a městské inženýrství	35
• Architektura v pozemním stavitelství	37
• Konstrukce pozemních staveb	49
• Realizace staveb	76
• Městské inženýrství	139
2. Dopravní stavby	161
• Pozemní komunikace.....	163
• Železniční konstrukce a stavby.....	193
3. Konstrukce, stavební zkušebnictví a geotechnika	205
• Konstrukce betonové a zděné.....	207
• Konstrukce kovové, dřevěné a kompozitní.....	249
• Geotechnika.....	298
• Stavební inženýrství.....	310
4. Stavební mechanika	351
5. Vodní hospodářství a vodní stavby	397
• Vodní hospodářství krajiny.....	399
• Vodní hospodářství obcí.....	428
• Vodní stavby.....	475
6. Stavebně materiálové inženýrství	519
• Fyzikální a chemické vlastnosti stavebních hmot.....	521
• Nové stavební hmoty.....	590
7. Management stavebnictví	615
8. Geodézie, kartografie a geoinformatika	681
9. Stavební fyzika a technická zařízení budov	725
• Technická zařízení a energie budov.....	727
• Stavební fyzika a prostředí v budovách.....	757

SECTIONS OF THE CONFERENCE JUNIORSTAV 2021

1. Building Constructions, Architecture and Municipal Engineering	35
• Architecture in Building Constructions	37
• Building Structures	49
• Construction Management	76
• Municipal Engineering	139
2. Transportation Engineering	161
• Road Structures	163
• Railway Structures and Constructions.....	193
3. Structures, Building Testing and Geotechnics	205
• Concrete and Masonry Structures.....	207
• Metal, Timber and Composite Structures.....	249
• Geotechnics.....	298
• Building Testing.....	310
4. Structural Mechanics	351
5. Water Management and Water Structures	397
• Landscape Water Management.....	399
• Municipal Water Management.....	428
• Water Structures.....	475
6. Building Materials and Components	519
• Physical and Chemical Properties of Building Materials.....	521
• Contemporary Building Materials.....	590
7. Structural Economics and Management	615
8. Geodesy, Cartography and Geographic Information Science	681
9. Building Physics, Building Services	725
• Building Services and Energy.....	727
• Building Physics and Indoor Environment.....	757

1. POZEMNÍ STAVITELSTVÍ ARCHITEKTURA A MĚSTSKÉ INŽENÝRSTVÍ BUILDING CONSTRUCTIONS, ARCHITECTURE AND MUNICIPAL ENGI- NEERING

ARCHITEKTURA V POZEMNÍM STAVITELSTVÍ ARCHITECTURE IN BUILDING CONSTRUCTIONS

Aplikace inženýrského přístupu v rámci požární bezpečnosti Application of Engineering Approach in the Fire Safety <i>Petra Okřínová, Tomáš Apeltauer, Jiří Apeltauer</i>	37
Zastrešene ruín v architektonických kontextoch Ruin Cover Structures in Architectural Contexts <i>Martin Poliak</i>	43
Vliv časových intervalů mikrovlnného vysoušení zdiva na konečný výsledek vysoušení Influence of Time Intervals of Microwave Drying of Masonry on the Final Result of Drying <i>Vendula Kvapilová</i>	49

KONSTRUKCE POZEMNÍCH STAVEB BUILDING STRUCTURES

Zkoušení požární odolnosti stavebních konstrukcí Fire Resistance Testing of Building Structures <i>Tomáš Žajdlík, Karel Šuhajda</i>	53
Zhodnocení vlivu materiálů šikmé střechy na tepelnou stabilitu dynamickou metodou Evaluation of the Influence of Sloping Roof Materials on the Thermal Stability Using the Dynamic Method <i>Ondřej Pilný</i>	58
Vliv popínavých rostlin na povrchovou vlhkost stavebních konstrukcí Influence of Climbing Plants on the Surface Moisture of Building Structures <i>Jana Bartlová</i>	64
Návrh fasádního panelu za pomoci parametrického modelování a aditivní výroby Design of a Facade Panel Using Parametric Modeling and Additive Production <i>Jan Vystrčil, Tatiana Rebrova</i>	70

REALIZACE STAVEB CONSTRUCTION MANAGEMENT

Analýza zařízení staveniště v hustě zastavěném území Analysis of the Construction Site Equipment in Densely Built Areas <i>Dita Hořínková</i>	76
Úvod do udržitelné výstavby Introduction to Sustainable Construction <i>Jana Budajová</i>	82
Struktura negrafických dat pro využití LCA v BIM: případová studie Structure of Non-Graphical Data for the Use of LCA in BIM: a Case Study <i>Michal Brandtner, Adam Boháček</i>	88

Porovnání uhlíkové stopy materiálu hydroakumulační vrstvy předpěstovaných vegetačních panelů Comparison of Carbon Footprint of Hydroaccumulation Layer Material of Pre-Grown Vegetation Panels <i>Lukáš Bříza</i>	94
Srovnání doby výstavby extenzivní zelené střechy konstruované z předpěstovaných panelů a pomocí klasické konstrukce Comparison of the Construction Time of the Extensive Green Roof Constructed from Prefabricated Panels and Classical Construction <i>Martin Hejl</i>	99
Přesuny hmot v souvislosti s realizací zelených střech Materials Transfers in Connection with the Implementation of Green Roofs <i>Jan Jilek</i>	105
Lepidla ve stavebnictví Adhesive in Construction <i>Aleš Průcha</i>	113
Porovnání soudržnosti a přilnavosti tmelu a sklocementu po vystavení účinkům vody Comparison of Cohesion and Adhesion of Sealant and Glass-Cement after Exposure to Effects of Water <i>Adam Boháček, Michal Brandtner</i>	117
Vliv působení vody na rozměrové změny OSB desky Influence of Water Effect on Dimensional Changes in Oriented Strand Board <i>Jiří Patloka, Erika Kratochvílová</i>	122
Vzlínání vlhkosti v OSB desce opatřené různými druhy povrchových úprav Rising Damp in Oriented Strand Board Treated with Different Types of Surface Finishes <i>Erika Kratochvílová, Jiří Patloka</i>	127
Účinnost magnetokinetických metod při sanácii historických konstrukcí Efficiency of Magnetokinetic Methods in the Rehabilitation of Historical Constructions <i>Patrik Štastný</i>	133
MĚSTSKÉ INŽENÝRSTVÍ MUNICIPAL ENGINEERING	
Vnímání městských scén a hodnota pohledu Perception of Urban Scenes and the Value of View <i>Daniel Kliment</i>	139
Transformace prostorových dat pro potřeby simulace pěších Spatial Data Transformation for Pedestrian Simulation <i>Jan Brožek</i>	144
Analýza pohybu a stacionárních aktivit v profilu městské třídy An Analysis of the Movement and Stationary Activities in a City Boulevard Profile <i>Jan Tichý, Tomáš Pavlovský</i>	150
Posouzení evakuačních standardů osob s handicapem s využitím modelu evakuace Assessment of Evacuation Standards of Persons with Movement Restrictions Using the Evacuation Model <i>Lucie Dobiášová, Tomáš Apeltauer</i>	155

2. DOPRAVNÍ STAVBY TRANSPORTATION ENGINEERING

POZEMNÍ KOMUNIKACE ROAD STRUCTURES

Autobusová nádraží – cestující a vozidla Bus Stations – Passengers and Vehicles <i>Pavel Stupka</i>	163
---	-----

Úroveň kvality pěší dopravy v kontextu států střední evropy Pedestrian Level of Service in Context of Central European Countries <i>Hana Kobzová, Tomáš Efenberk</i>	169
--	-----

Analýza mobility v meste z hľadiska vyhodnotenia multimodálnych kritérií Analysis of Mobility in the City from the Point of View of the Evaluation of Multimodal Criteria <i>Jakub Takács</i>	175
---	-----

Detekce přítomnosti R-materiálu v asfaltových směsích s využitím metody postupné extrakce asfaltového pojiva Detection of the Presence of RAP in Asphalt Mixtures Using the Method of Staged Extraction of Asphalt Binder <i>Jiří Sachr</i>	181
---	-----

Rozdělení pravděpodobnosti dopravní poptávky ve zvolený den a čas Probability Distribution of Traffic Demand on Chosen Weekday and Time of Day <i>Igor Mikolášek</i>	187
--	-----

ŽELEZNIČNÍ KONSTRUKCE A STAVBY RAILWAY STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

Akustická analýza průjezdu tramvají přes kolejovou konstrukci odbočení se srdcovkou s mělkým žlábkem Acoustic Analysis of Tram Passage over a Switch with Shallow Crossing <i>Ondřej Bret</i>	193
---	-----

Výsledky porovnávacích měření rayleighova vlnění in situ a ve zkušebním boxu Results of Comparative Measurements of Rayleigh Wave In Situ and in Testing Box <i>Michal Peťárek, Leoš Horníček</i>	199
---	-----

3. KONSTRUKCE, STAVEBNÍ ZKUŠEBNICTVÍ A GEOTECHNIKA STRUCTURES, BUILDING TESTING AND GEOTECHNICS

KONSTRUKCE BETONOVÉ A ZDĚNÉ CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

Únosnost ztužujících železobetonových stěn s otvorem Load Carrying Capacity of the Reinforced Concrete Shear Walls with an Opening <i>Ondřej Šimek, Miloš Zich</i>	207
--	-----

Šmyková odolnost' fragmentu desky v pretlačení overená experimentálnym testom Punching Shear Resistance of a Slab Fragment Verified by Experimental Test <i>Simona Šarvaicová</i>	212
---	-----

Mechanické vlastnosti sendvičových kompozitných konštrukcií Mechanical Properties of Sandwich Composite Structures <i>Pavína Zlámalová, Marie Lipoldová</i>	218
Tahová pevnost kompozitní výztuže v místě ohybu Tensile Strenght of Bended Composite Reinforcement <i>Juraj Lagiň</i>	225
Verifikace teplotního průběhu po výšce štíhlé konstrukce v čase Verification of Temperature Gradient of Slender Structure in Time <i>Marek Velešik, Michal Požár, Radim Nečas</i>	231
Experimentálne stanovenie síl v závesoch lávky pre peších Experimental Determination of Cable Force of a Pedestrian Bridge <i>Kristína Bezručová</i>	237
Možnosti nepriameho určovania predpätia Possibilities of Indirect Determination of Prestressing <i>Jakub Kraňovanec, Martin Moravčík</i>	243
KONSTRUKCE KOVOVÉ, DŘEVĚNÉ A KOMPOZITNÍ METAL, TIMBER AND COMPOSITE STRUCTURES	
Vplyv vybraných parametrov na napätia v skrutkovom spoji v skle Effect of the Chosen Parameters on Stress in Bolted Connection in Glass <i>Lucia Ondrušková</i>	249
Parameter dĺžky nasunutia na nasúvaný spoj Parameter of Overlap Length on Slip Joint Connection <i>Maroš Mojto</i>	255
Analýza teplotných polí pri zváraní oceľových konštrukcií Analysis of Temperature Fields During Welding of Steel Structures <i>Adam Petrik</i>	261
Limita vzpernej pevnosti oceľových trubek vyplnených betonem při použití materiálů vysokých pevností Limit of the Buckling Strength of Concrete Filled Steel Tubes When Using High Strength Materials <i>Pavla Bukovská</i>	267
Nelineárna numerická analýza membránovej konštrukcie Numerical Nonlinear Analysis of a Membrane Structure <i>Lenka Štulerová, Lukáš Kapolka, Stanislav Kmet'</i>	272
Numerická analýza hliníkových a nerezových kotviacich profilov sklenených zábradlí Numerical Analysis of Anchoring Profiles Made out of Aluminium and Stainles Steel for Glass Balustrades <i>Martin Lavko, Daniel Dubecký, Vincent Kvočák, Oto Roth</i>	277
Teoretický výzkum optimalizace rozměrů a volby pevnosti materiálu u ocelobetonových spřažených nosníků Theoretical Research of Dimensional Optimalization and Choice of Material Strength in Steel-Concrete Composite Beams <i>Kristýna Hrabovská, Jan Břečka</i>	283
Parametrická studie odolnosti dřevobetonových spřažených nosníků Parametrical Study of Timber-Concrete Composite Beams Resistance <i>Jan Břečka, Kristýna Hrabovská</i>	289

Ohybové testy vyřahčených nosníků Flexural Tests of Lightened Beams <i>Patricia Vaňová, Vincent Kvočák</i>	294
--	-----

GEOTECHNIKA GEOTECHNICS

Evaluation of the Relative Density of River Gravels from the Results of Dynamic Penetration Resistance <i>Eliška Kučová</i>	298
--	-----

Mikrovyztužování zemin vlákny zhotovenými pomocí 3D tisku Fibre-Reinforced Soil by 3D Printed Fibre <i>Pavel Koudela, Juraj Chalmovský, Lumír Miča</i>	304
--	-----

STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ BUILDING TESTING

Vliv vlhkosti dřeva na hloubku vrtu při zkoušení Kučerovou vrtačkou Influence of Wood Humidity on the Drill Depth During the Testing by a Kučera Drill <i>Pavel Černý, Romana Halamová</i>	310
--	-----

Porovnanie výsledkov skúšok z CPT a DPT pre hrubozrnné zeminy Comparison of Results from CPT and DPT Tests for Coarse Grained Soils <i>Ján Mihálik, Roman Bulko</i>	316
---	-----

Možnosti optimalizace vybraných vlastností betonu s obsahem betonového recyklátu Possibilities of Optimizing Selected Properties of Concrete Containing Concrete Recycled Aggregate <i>Věra Sikorová</i>	322
--	-----

Úprava betonového recyklátu a z něj připraveného betonu epoxidovou disperzí i silikátovými příměsemi Treatment of Recycled Concrete and Concrete Prepared from it with Epoxy Disperison and Silicate Admixtures <i>Jana Knapová, Michal Stehlik</i>	327
---	-----

Současné možnosti ověření vyplnění kabelových kanálků s využitím nejmodernějších přístrojů Current Possibilities of Verifying the Filling of Cable Ducts by Using Modern Devices <i>Jaroslav Šnědar, Vojtěch Bartoň, Petr Cikrle</i>	333
--	-----

Použití ultrazvukové metody pro odhalení vnitřních vad v železobetonových konstrukcích Application of Ultrasonic Pulse Method for Detection of Internal Defects in Reinforced Concrete Structures <i>Sabina Hübllová, Kristýna Hrabová</i>	339
--	-----

Zacílená rentgenová tomografie s vysokým rozlišením High Resolution Region of Interest X-Ray Tomography <i>Ivana Kumpová, Michal Vopálenký</i>	344
--	-----

4. STAVEBNÍ MECHANIKA STRUCTURAL MECHANICS

Cenzurované vzorkování jako nástroj v úlohách spolehlivosti Triangulation-Based Rejection Sampling in Reliability Analysis <i>Aleksei Gerasimov, Miroslav Vořechovský</i>	353
---	-----

Exploration of Simple Kriging Method <i>Gizem Erdiñ, Miroslav Vořechovský</i>	359
Taylor Series Expansion for Functions of Correlated Random Variables <i>Lukáš Novák</i>	364
Porovnanie zjednodušenej a SPH metódy modelovania rázovo zaťažených betonových konštrukcií A Comparison of Simplified and SPH Method for Modelling Concrete Structures Exposed to Impact Loads <i>Daniel Jindra</i>	369
Porovnání součinitele intenzity napětí (režim I) v lineární lomové mechanice pomocí FEM a XFEM Comparison of Stress Intensity Factor (Mode I) in Linear Fracture Mechanics Using FEM and XFEM <i>Michal Jedlička</i>	375
Porovnání modelů tahového změkčení při numerické simulaci lomových zkoušek betonových trámů The Comparison of Tensile Softening Models in Numerical Simulation of Fracture Tests of Concrete Beams <i>Martin Lipowczan, David Lehký</i>	379
Vliv výrobních tolerancí zkušební tělesa na hodnotu iniciační síly The Influence of Dimensional Tolerances of Test Specimen on Estimation of Initial Force Value <i>Michal Vyhliďal, Jan Klusák</i>	385
Vliv agresivního prostředí na lomovou odolnost v kombinovaném módu I/II namáhání Influence of the Aggressive Environment on the Fracture Resistance Under the Mixed Mode I/II Load <i>Petr Miarka, Stanislav Seitl</i>	391

5. VODNÍ HOSPODÁŘSTVÍ A VODNÍ STAVBY WATER MANAGEMENT AND WATER STRUCTURES

VODNÍ HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

Použitie regionálneho klimatického scenára CLM pri analýze sezónnosti krátkodobých zrážok Analysis of the Short-Term Rainfall Seasonality Using the CLM Regional Climate Scenario Data <i>Gabriel Foldes, Silvia Kohnová</i>	399
Problematika modelovania kvantitatívnej vodohospodárskej bilancie povrchových vôd v modeli WEAP Problematics of Modeling of Quantitative Water Management Balance of Surface Water in the WEAP Model <i>Miroslav Kandra</i>	403
Agrolesnická opatrení v rámci pozemkových úprav a jejich vliv erozní a odtokové poměry Agricultural Measures in the Framework of Land Consolidation and Their Influence on Soil Properties <i>Kateřina Suchá, Věra Horáková, Miroslav Dumbrovský</i>	409
Doplnenie nemeraných koncentrácií plavenín Replenishment of Unmeasured Concentrations of Suspended Sediments <i>František Cypriř</i>	416
Průběh dlouhodobého testu denitrifikace Process of Long Denitrification Test <i>Kristina Pániková</i>	422

VODNÍ HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

Stanovení účinnosti aktivního uhlí při odstraňování léčiv z vody Evaluation of the Effectiveness of Activated Carbon in the Removal of Pharmaceuticals from Water <i>Daniela Lukášová, Renata Biela</i>	428
Experimentální odstranění kovů z vody za použití sorpčních materiálů Experimental Removal of Metals from Water Using Sorption Materials <i>Světlana Moravčíková, Renata Biela</i>	434
Návrh metodiky pro měření teploty pitné vody přes stěnu potrubí Design of Methodology for Measurement of Drinking Water Temperature through the Pipe Wall <i>Jana Nováková, Jan Ručka</i>	440
Variantní testování čištění a rekuperace tepla šedých odpadních vod Alternative Treatment and Heat Recovery of Greywater <i>Kristýna Velikovská, Ivo Korytář</i>	446
Změna odtoku vody v závislosti na tvaru podtlakového vtoku Change of Water Outflow Depending on the Shape of the Siphonic Drain <i>David Fučík, Jan Ručka</i>	451
Vplyv dažďového odtoku na hydraulické podmienky kanalizačného zberača Analysis of the Stormwater Runoff Impact on the Hydraulic Conditions of the Sewer Collector <i>Réka Wittmanová, Štefan Stanko</i>	457
Charakteristika odpadních vod vzniklých při čištění silničních tunelů Characteristics of Wastewater from Road Tunnels Washing <i>Ivo Korytář, Kristýna Velikovská</i>	463
Kvalita odpadní vody v závislosti na množství kyslíku Wastewater Quality Depending on Oxygen Amount <i>Veronika Singrová</i>	469
VODNÍ STAVBY WATER STRUCTURES	
Evaluation of the Impact of Intake Structure Shapes Based on Flow Homogeneity <i>Lucia Bytčanková, Ján Rumann</i>	475
Stanovení rychlosti eroze a erodibility průsakové cesty v píscích Rate of Erosion and Erodibility Calculation During Backward Erosion Piping in Sands <i>Lubomír Petrula</i>	481
Softwary pro simulace porušení sypaných hrází v důsledku vnitřní eroze Softwares for Simulation Dam Breach due to Internal Erosion <i>Stanislav Kotaška</i>	487
Citlivostní analýza vlivu prostorové diskretizace a parametrů turbulentního modelu při 2D numerickém modelování proudění vody Sensitivity Analysis of Space Discretization and Parameter of the Turbulent Model In 2D Numerical Modeling of Water Flow <i>Stanislav Kotaška</i>	494

Vliv parametrů turbulentního modelu na výsledky hydraulických výpočtů s použitím 2D numerického modelu HEC-RAS Influence of Turbulent Model Parameters on the Results of Hydraulic Calculations Using the 2D Numerical Model HEC-RAS <i>Šimon Pospíšilík</i>	500
Použití tří metod měření průtoku pro pokrytí rozsahu průtoku tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem Use of Three Flow Measurement Methods to Cover the Flow Range of Triangular-Notch Thin-Plate Weir <i>Šimon Pospíšilík</i>	506
Identifikace a kvantifikace nejistot při měření a vyhodnocení součinitele průtoku tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem Identification and Quantification of Uncertainties in the Measurement and Evaluation of the Discharge Coefficient of Triangular-Notch Thin-Plate Weir <i>Šimon Pospíšilík</i>	512
 6. STAVEBNĚ MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS 	
FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ VLASTNOSTI STAVEBNÍCH HMOT PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF BUILDING MATERIALS	
Dopad jemnosti mletia vápencov na ich reaktivitu The Impact of the Fineness of Limestones on Their Reactivity <i>Simona Ravaszová, Karel Dvořák</i>	521
Vliv typu vápence na rozklad uhličitanu vápenatého a následnou krystalizaci oxidu vápenatého Influence of Limestone Type on Decomposition of Calcium Carbonate and Subsequent Crystallization of Calcium Oxide <i>Dorothea Sklenářová, Karel Dvořák</i>	526
Mikrostruktura malt na bázi vzdušného vápna modifikovaných biopolymerními přísadami Microstructure of Biopolymer-Modified Aerial Lime Mortars <i>Tomáš Žižlavský</i>	532
Alkalicko-křemičitá reakce u alkalicky aktivovaných pojiv (zrychlené zkoušky) Alkali-Silica Reaction in Alkaline Activated Binders (Accelerated Tests) <i>Cecílie Mizerová</i>	538
Průběh hydratačních teplot při kombinaci vysokoteplotního a fluidního úletového popílku Course of Hydration Temperatures When Combining Hightemperature Fly Ash and Fluidized Bed Combustion Fly Ash <i>Milan Meruňka, Rudolf Hela</i>	543
Studium vlivu konzistence na odolnost vůči abrazi betonu Study of the Effect of Consistency to the Abrasion Resistance of Concrete <i>Onďřej Pikna, Rudolf Hela, Martin Ťažký</i>	549
Návrh vysokopevnostních betonů pro transportbeton Design of High Strength Concrete for Transport Concrete <i>Milan Meruňka, Martin Ťažký, Klára Křížová</i>	555

Súčasný poznatky o mikrobiologicky vyvolanej korózii betónu v kanalizačných konštrukciách: prehľad hodnotiacich metód Current Understanding on Microbiologically Induced Corrosion of Concrete in Sewer Structures: a Review of the Evaluation Methods <i>Miriama Hološová</i>	561
Chemická odolnosť trubiek vytvrzovaných na mieste (CIPP) Chemical Resistance of Cured-In-Place-Pipes (CIPP) <i>Jana Majerová, Rostislav Drochyta</i>	567
Syntéza žárovzdorné forsterit-spinelové keramiky z rôznych vstupných surovín Synthesis of Refractory Forsterite-Spinel Ceramics from Different Raw Materials <i>Martin Nguyen, Radomír Sokolář</i>	572
Vlhkostní vlastnosti smrkového dřeva Hygroscopic Properties of Spruce Wood <i>Petra Schütová, Kamil Staněk, Jan Richter</i>	578
Skúmanie tepelnoizolačných materiálov pri zmene relatívnej vlhkosti počas experimentálnej simulácii v klimateckej komore Investigation of the Thermal Insulation Materials When Changing Relative Humidity During Experimental Simulation in a Climate Chamber <i>Katarína E. Hellová, Terézia Cabanová</i>	584
NOVÉ STAVEBNÍ HMOTY	
CONTEMPORARY BUILDING MATERIALS	
Výzkum chemicky odolného materiálu pro rubovou injektáž The Research of Chemically Resistant Material for the Invert Injection <i>Petr Figala</i>	590
Vývoj polymerní hmoty s vysokým obsahem odpadního perlitu Development of Polymer-Based Material with High Content of Waste Perlite <i>Radek Hermann</i>	596
Využití fluidního úletového popílku jako substituce pojivové složky pórobetonu Experimental Studies on Autoclaved Aerated Concrete Using Circulating Fluidized Bed Combustion Fly Ash <i>Pavlna Ondříčková, Rostislav Drochyta</i>	602
Využití metody sol-gel pro výrobu bezcementových žárobetonů Use of the Sol-Gel Method for the Production of No Cement Castables <i>David Zemánek, Lenka Nevřivová</i>	608
7. MANAGEMENT STAVEBNICTVÍ	
STRUCTURAL ECONOMICS AND MANAGEMENT	
Inspection Activities via UAV Technology <i>Zbyněk Škoda</i>	617
Finanční náročnost municipality pro případ výstavby na zelené louce Financial Intensity of the Municipality in the Case of Construction on a Greenfield <i>Matěj Buňat</i>	621

Analýza přírůstku zaměstnanců a obyvatel z podlažních ploch velkých developerských projektů Analysis of Incremental Capacities of Jobs and Residents from Floor Areas of Big Development Projects <i>Svatopluk Pelcák</i>	627
Vplyv verejného projektu revitalizácie brownfieldu na rozvoj zamestnanosti Impact on Employment Development Under the Influence of Public Project Oriented on Brownfield Revitalization <i>Jakub Sabo</i>	631
Modelovanie zmien pozdĺžnej nerovnosti asfaltovej vozovky Modelling of Changes in the Longitudinal Unevenness of the Asphalt Road <i>Michaela Ďurinová, Ján Mikolaj</i>	636
Studie pohybu obyvatel ve městě Brně Study of Movement of Population in the City of Brno <i>Jiří Rouzek</i>	642
Metody hodnocení investičních a neinvestičních projektů silniční infrastruktury v ČR Evaluation Methods of Investment and Non-Investment Road Infrastructure Projects in the Czech Republic <i>Pavel Krupík</i>	646
Možnosti hodnocení multikriteriální analýzou Possibilities of Evaluation by Multicriteria Analysis <i>Jakub Kotrla</i>	651
Modely odpadového hospodárstva a ich možnosti použitia v ekonomických analýzách Waste Management Models and Their Possibilities of Use in Economic Analyzes <i>Martin Marek</i>	657
Environmentální certifikace budov – situace v České republice Environmental Certification of Buildings – the Situation in the Czech Republic <i>Zuzana Mrňová, Alena Tichá</i>	663
Komplexní analýza trhu s dřevostavbami Complex Wood Based Houses Market Analysis <i>Tomáš Hrdlička</i>	669
Analýza trhu s rodinnými domy a vliv jejich stavebně technického stavu na tržní cenu Houses Market Analysis and the Influence of Their Construction Technical Condition on the Market Price <i>Tereza Jandásková</i>	675

8. GEODÉZIE, KARTOGRAFIE A GEOINFORMATIKA GEODESY, CARTOGRAPHY AND GEOGRAPHIC INFORMATION SCIENCE

Aplikácia na obnovu katastrálneho operátu korekciou Application for the Cadastral Operate Renewal by Correction <i>Peter Kysel'</i>	683
Automatizovaná kontrola kvality realizácie stavebných objektov Automated Quality Control of Realisation of Building Structures <i>Gabriela Bariczová, Ján Erdélyi</i>	689
Algoritmus na automatizovanú identifikáciu a odhad sférických tvarov z mračien bodov Algorithm for Automated Identification and Segmentation of Spheres from Point Clouds <i>Richard Honti</i>	695

3D Mountain Map with Augmented Reality for Navigation <i>Dobrin Petkov, Nikola Yonov</i>	701
Vliv prekalibrace kamery DJI FC300S na přesnost fotogrammetrických výsledků Effect of DJI FC300S Pre-Calibration on the Accuracy of Photogrammetric Results <i>Jakub Nosek, Petr Kalvoda, Michal Kuruc, Tomáš Volařík, Petra Stránská</i>	707
Využití RPAS a SFM fotogrammetrie v zastavěných oblastech Usage of RPAS and SFM Photogrammetry in Urban Areas <i>Miroslava Kubičková, Jakub Nosek, Richard Kratochvíl, Jiří Vondrák</i>	713
Accuracy Evaluation of Precise Point Positioning <i>Jakub Nosek, Zuzana Richterová, Radovan Machotka</i>	719

9. STAVEBNÍ FYZIKA A TECHNICKÁ ZAŘÍZENÍ BUDOV BUILDING PHYSICS, BUILDING SERVICES

TECHNICKÁ ZAŘÍZENÍ A ENERGIE BUDOV BUILDING SERVICES AND ENERGY

Minimalizace neobnovitelné primární energie při vytápění pasivního RD Minimization of Non-Renewable Primary Energy in the Heating of Passive Houses <i>Jan Osička, Miloš Kalousek</i>	727
Vliv přenosu tepla mezi potrubím teplé a studené vody na množení bakterie legionella Influence of Heat Transfer Between Hot and Cold Water Pipes on the Growth of the Legionella Bacteria <i>Jan Moštěk, Jakub Oravec</i>	733
Comparison of Production and Storage of Cold Using Heat Pump <i>Matej Kubica, Daniel Kalús</i>	739
Podíl roční dodané energie na vytápění pro doplňkový elektrický předehřev vzduchotechnických jednotek Part-Year Supplied Energy for Supplement Electric Preheating of Air Conditioning Units <i>Dominik Cakl, Petr Kotek</i>	745
Zabezpečenie požadovanej teploty studenej pitnej vody vo vodovode v budove Ensuring the Required Potable Water Cold Temperature in Water Supply System Inside Buildings <i>Dominika Macková, Jana Peráčková</i>	751

STAVEBNÍ FYZIKA A PROSTŘEDÍ V BUDOVÁCH BUILDING PHYSICS AND INDOOR ENVIRONMENT

Kvalita vnitřního prostředí v bytových jednotkách v různých etapách interiérových úprav Indoor Environmental Quality of Apartments Units in Different Stages of Interior Construction <i>Katarína Harčárová</i>	757
Zamezení vzniku kondenzace na okenním zasklení a v přípojovací spáře Prevention of Condensation on the Window Glazing and on the Connection Joint <i>Petra Vorlíčková, Miloš Kalousek</i>	765
Využití odpadních tepelně-izolačních materiálů pro výplňové hmoty do keramických dutinových tvarovek The Use of Waste Thermal Insulation Materials for Filling Materials in Ceramic Hollow Bricks <i>David Průša, Stanislav Šťastník, Karel Šuhajda</i>	771

Stanovení závislosti součinitele tlakových ztrát na geometrii vzduchotechnických kolen Determination of the Dependence of the Pressure Loss Coefficient on the Ventilation Elbows Geometry <i>Michal Nováček</i>	777
Délka trvání špiček v odběru vody v bytovém domě v různých dnech Duration of Maximum Water Collection in an Apartment Building at Different Day <i>Jan Moštěk</i>	783
Predikce činitele zvukové pohltivosti helmholtzových rezonátorů pro účely inženýrské praxe Prediction of Sound Absorption Coefficient of the Helmholtz Resonators for Engineering Practice <i>Ondřej Nespěšný, David Jun</i>	789

1.

Pozemní stavitelství, architektura a městské inženýrství

Building Constructions, Architecture and Municipal Engineering

APLIKACE INŽENÝRSKÉHO PŘÍSTUPU V RÁMCI POŽÁRNÍ BEZPEČNOSTI

APPLICATION OF ENGINEERING APPROACH IN THE FIRE SAFETY

Petra Okřínová^{*1}, Tomáš Apeltauer¹, Jiří Apeltauer²

^{*} Petra.Okrinova@vut.cz

¹ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno-střed

Abstrakt

Požárně bezpečnost posouzení stavby je proces, u kterého je nutné zohlednit řadu technických požadavků a aspektů, které předepisují české právní předpisy a technické normy. Požadavky vycházející z těchto dokumentů jsou závazné a formují konkrétní nároky na stavby a jejich řešení, které musí být zohledněny již v návrhové fázi projektu, a to jak v jeho stavební, tak i v technologické části. V rámci požárně bezpečnostního posouzení předpisy připouštějí možnost využití dvou základních návrhových přístupů, a to normového přístupu a přístupu inženýrského. Následující práce představuje vybrané příklady aplikace inženýrského přístupu (konkrétně pomocí metod FEM a CFD) pro požárně bezpečnostního řešení v porovnání s hodnotami získanými klasickým normovým přístupem.

Klíčová slova

Požární bezpečnost, posouzení, inženýrský přístup, modelování, evakuace

Abstract

Fire safety assessment of a building is a process in which it is necessary to take into account a number of technical requirements and aspects prescribed by Czech legislation and technical standards. The requirements based on these documents are binding and form specific requirements for buildings and their solutions, which must be taken into account in the design phase of the project, both in its construction and in the technological part. As part of the fire safety assessment, the regulations allow for the possibility of using two basic design approaches, namely the standard approach and the engineering approach. The following work presents selected examples of the application of the engineering approach (specifically using the FEM and CFD methods) for fire safety solutions in comparison with the values obtained by the classical standard approach.

Key words

Fire safety, assessment, engineering approach, modeling, technical standard, evacuation

1 ÚVOD

V dnešní době je požárně bezpečnostní řešení stavby stanoveno komplexním souhrnem požadavků a podmínek, tzv. požárním kodexem, které jsou závazné a musí být zohledněny již v návrhové fázi projektu. Požární kodex je kvalitním nástrojem požární bezpečnosti. V některých ohledech dokonce nadále převyšuje kvality standard a norem jiných zemí v EU, ale i přes tento fakt je zapotřebí, aby byl pravidelně novelizován, dokázal reagovat na nové směry vývoje a inovativní potřeby stavebnictví. Dnes se oproti minulosti setkáváme s dříve nemyslitelnými technologiemi, které naprosto přepisují konvenční a zaběhlé přístupy - co se týče, jak z pohledu materiálového (využití recyklovaných materiálů, plastových dílců, kompozitu, lehčených materiálů, izolantů), tvarové rozmanitosti (3D tisk, organické struktury, subtilní konstrukce), provozu (multifunkční prostory, stavby s vysokou kapacitou – stadióny), výšky (výškové budovy), podzemní stavby (garáže, metro, obchodní centra) apod. Aktuálně se v projektech i realizacích setkáváme s různými spojeními těchto možností, které jsou posuzovány stále převážně klasickým normativním přístupem, což nám nabízí otázku, jestli i v takto specifických případech je vhodné postupovat dle normativního přístupu nebo by tyto budovy vymykající se z tradiční výstavby měly být posuzovány jinak?

Při pohledu do zahraničí, kde jsou numerické modely běžnou součástí praxe pro účel požárně bezpečnostního posouzení [1], [2], [3], [4], ale také budoucí vývoj stavebnictví, se dá předpokládat potřeba zavedení numerického modelování i na našem území. Prozatím tento přístup není v České republice významně rozšířen možná i z důvodu,

že uživatelé a odborná veřejnost není zcela obeznámena s existencí těchto metod a jejich možnostmi, i když vědní disciplína zabývající se požární bezpečností (evakuací, rozvojem požáru, šířením toxických plynů a jejich vlivu na osoby atd.) je v rozvoji již několik desítek let. Je tedy možné pro informovanost a zavádění nového přístupu vycházet z již známých poznatků, studií a metodik primárně ze zahraničních zdrojů [5], [6], [7], [8].

2 METODIKA

V současnosti je požárně bezpečnostní posouzení (PBR) podřízeno primárně platné legislativě [9], [10], [11], [12], českým technickým normám, tzv. požárního kodexu ČSN 73 08XX vycházejícího z technických norem z 80. let, kde jsou předepsané obecné postupy a požadavky na požární bezpečnost staveb, které jsou stanovovány na základě přesně definovaných postupů – tabelárně či zjednodušenými výpočtovými metodami. Tento normový přístup může být doplněn případně o schválené výpočtové postupy, např. z Eurokódů. Obecně technické normy nejsou závazné, přesto podle výlučného odkazu na přílohu vyhl. Ministerstva vnitra č. 23/2008 Sb., o technických podmínkách požární ochrany staveb (ve znění vyhlášky č. 268/2011 Sb. a dalších platných předpisů) [12], se stal požární kodex spolu s dalšími návaznými normami součástí závazného právního předpisu a jeho užívání je povinné.

V rámci české legislativy, konkrétně dle §99 zákona č. 133/1985 Sb. o požární ochraně [13], umožňuje autorizovaným osobám při návrhu PBR užívat odlišný od postupu, který stanoví česká technická norma nebo jiný technický dokument upravující podmínky požární ochrany. O tzv. rozšířeném přístupu k řešení požární bezpečnosti a postupu odlišného od klasického normativního, vychází primárně ze souboru norem ČSN 73 08XX, kde v článku 5.1.3 a příloze I (ČSN 73 0802) je připouštěna možnost vypracování PBR pomocí tzv. „inženýrského přístupu“. Další zmínky můžeme najít i v člancích 6. 6. 10, 6. 6. 12, 8. 4. 6, 9. 1. 1. 1. Ve zdroji [16], článek 5.1.3 říká, že „u stavebních objektů, kde je soustředěn velký počet osob (např.: v metru), nebo u objektů ze specifického charakteru provozu (např.: automatický provoz) vyžadujících podrobnější, popř. částečně odchylné řešení oproti této normě, se doporučuje zpracovat odborné expertízy (expertní zprávy, expertní posudky apod.) k projektovému řešení požárního zajištění těchto objektů. V odborné expertize se může užit přesnějších výpočtových metod, analyzujících podrobněji podmínky posuzované stavby po vzniku požáru, zejména intenzitu požáru, jeho šíření a šíření zplodin hoření, podmínky evakuace a zásahu s ohledem na užívání a provoz objektu“.

Odlišný přístup požárně bezpečnostního řešení je navrhováno na bázi výsledků kvalitativních a kvantitativních analýz na základě zahraničních technických standardů [5, 6, 7, 8], metodické postupy akceptované v tuzemsku [14] anebo tzv. požárního inženýrství (mezi které patří např. i numerické modelování). Tento postup přináší možnost komplexního specifického posouzení PBR u nestandardních a vysoce rizikových objektů, které se jak svojí rozlohou a počtem lidí (sportovní stadiony, koncertní sály), tak i složitostí (hotely, obchodní domy) či charakterem provozu (metro) zcela vymykají tradičním stavbám. V případech, kdy není možno klasickým tabulkovým způsobem dostatečně zohlednit specifičnost stavby nebo některých jejích částí, je možné pro stanovení požadavků na PBR využít inženýrského přístupu, jelikož je v těchto případech normativní přístup příliš obtížný nebo konzervativní a odlišuje se od skutečnosti. Přístup umožňuje užit přesnějších výpočtových a analytických metod (jakým je třeba model evakuace nebo model požáru, zakouření a šíření toxických látek) za účelem analýzy průběhu evakuace a vývoje požáru (zakouření, toxicitu, vliv konstrukce, ...) či posouzení podmínek pro zásah HZS a IZS. Lze tedy říci, že přesnější metody výpočtů a analýzy slouží k upřesnění konečného stanovení požadavků PBR a nutných požárně bezpečnostních opatření. Hlavním cílem tohoto specifického posouzení je hospodárný návrh požárně bezpečnostních opatření, při zachování akceptovatelné úrovně požární bezpečnosti a zohlednění čl. 5.1.3, kde je uvedeno, že by toto řešení nemělo zapříčinit zásadní překročení limitních hodnot stanovených požárním kodexem ČSN 73 08XX [16]. Pokud by i přesto došlo k razantnímu snížení požadavku na PBR oproti standardům, lze takové řešení považovat za přijatelné pouze v případě předložení kompletních výsledků expertízy, včetně detailního komentáře [15].

3 VYBRANÉ APLIKACE A VÝSLEDKY INŽENÝRSKÉHO POSOUZENÍ

Během inženýrského posouzení je možné provést detailní analýzu posuzovaného objektu, který je definován třemi základními sadami charakteristik, jako jsou vlastnosti budovy (dispoziční členění, materiálové řešení, dimenze únikových koridorů, vnitřní prostředí), vlastnosti evakuovaných osob (věkové složení, mobilita osob, reakce na pokyn k evakuaci) a vlastnosti požáru (materiál hoření, chemické složení, množství materiálu).

V této části jsou představeny vybrané výsledky aplikací numerických modů v rámci požárně bezpečnostního posouzení, které z části vznikly v rámci vědecko-výzkumného projektu - *Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb (VI20162019034)* při tvorbě metodiky [21] a následně i při tvorbě disertační práce autorky.

Aplikační příklad

Jako příklad aplikace inženýrského přístupu bylo zvoleno posouzení nemocniční lůžkové oddělení. Oddělení je posuzováno s plnou kapacitou – 37 pacientů, 7 příchozích a 4 personál oddělení. Dispoziční řešení oddělení tvoří páteřní chodba s šířkou 2,4 m, která zároveň slouží jako nechráněná úniková cesta (NÚC), do níž vedou východy ze všech 18 pokojů. Po obou stranách chodba ústí do CHÚC k evakuačnímu schodišti a výtahu. V rámci posouzení je aplikovaný scénář, kdy v pokoji číslo 5 dochází ke vzniku požáru a následně evakuaci všech pacientů do bezpečí.



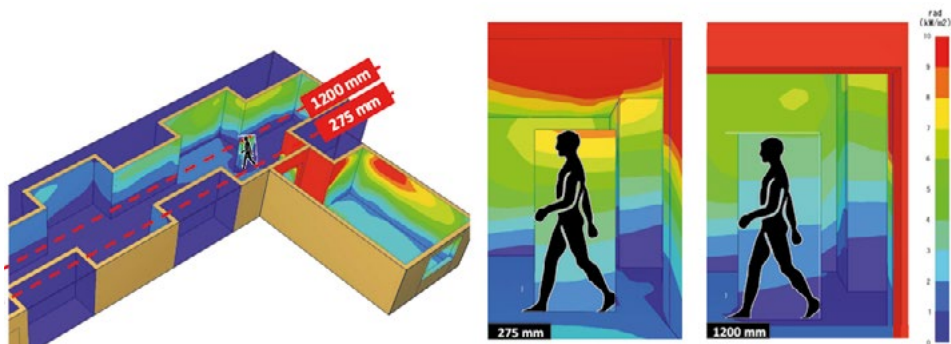
Obr. 1 Schéma posuzovaného objektu [15], [21].

Při posouzení probíhá komplexní analýza evakuace unikajících osob a jejich ohrožení účinky požáru, hladinou toxicity, výškou zakouřené vrstvy, radiací či statickým selháním konstrukce – po celou dobu evakuace. Běžné postupy PBR nejsou schopny předvídat detailní vývoj jednotlivých dějů, a proto pro jejich analýzu je využíván inženýrský přístup - konkrétně numerický model evakuace, šíření požáru a toxicity. Díky němu je možné řešit i nestandardní detaily a materiálové řešení (mimo tabulkové hodnoty norem – v tomto případě uvažován spalovaný materiál nylon) a podrobné vyhodnocení teplotních polí expozice a jednotlivých posuzovaných konstrukcí. Běžné požárně bezpečnostní posouzení takové stavby probíhá dle normových předpisů [16], [17], [18], [19], [20], dle zjednodušených výpočtů a tabelárních hodnot, kde výsledkem je zpravidla jedna číselná hodnota.

Analýza účinků požáru na osoby unikající na volné prostranství.

Míra ohrožení osoby běžící kolem zcela požárně otevřené plochy (dveří zasaženého pokoje) v blízkosti NÚC (chodba) od účinků požáru se stanovuje dle ČSN 73 0810 čl. 5.3.5, který říká, že osoby nejsou ohroženy, pokud hustota tepelného toku působící na unikající osoby (měřeno v ose nejbližšího ÚP k sálavé ploše) není vyšší jak $10 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ do dobu 5 s, při rychlosti osob $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Hodnota tepelného toku nesmí být překročena, ani kdyby expozice osob byla kratší dobu.

Při normovém výpočtu dle čl. 5.3.5 a) jsou hodnoty hustoty tepelného toku pro vzdálenost osy únikového pruhu od stěny chodby 275 mm - $8,1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ a pro polohu osy únikového pruhu v ose chodby, tj. ve vzdálenosti 1 200 mm od stěny je vypočtená hustota tepelného toku je v ose únikového pruhu $4,3 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Osoby unikající z objektu tedy nejsou ohroženy. Výsledky z modelu CFD jak je možné vidět na Obr. 2, se s výsledky normového výpočtu shodují.

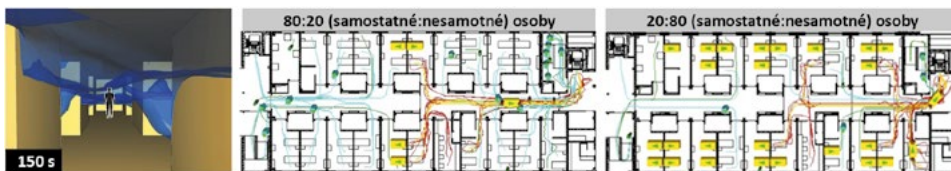


Obr. 2 Vývoj expozice rozvinutého požáru na unikající osobu, 150 s – celkový pohled (vlevo), ve vzdálenosti 275 mm od POP (ve středu) a ve vzdálenosti 1200 mm od POP (vpravo) [21].

V rámci normového posouzení je hodnocen předpokládaná doba evakuace (ČSN 73 0802 dle čl. 9.12.2, ČSN 73 0835) při které všechny osoby mají stejné rychlosti chůze a doba zakouření vycházející z množství uvolněných zplodin (dle ČSN 73 0802 čl. 9.1.2 a)), kdy dochází k posouzení ohrožení osob zplodinami hoření a kouře. Předpokládaná doba evakuace musí vždy být nižší než doba zakouření. Dále jsou hodnoceny mezní délky a šířky únikových cest (dle ČSN 73 0802 čl. 6.4.2 až 6.4.11. a čl. 8.4.1 až 8.4.5.), kde podmínky evakuace z požárního úseku jsou stanoveny součinitelem s , který ovlivňuje potřebný počet únikových pruhů ve vazbě na obsazenost oddělení podle schopnosti/neschopnosti/případně omezení samostatného pohybu. Což je ale také i jediným způsobem zohledněna mobilita evakuovaných. Dle normového přístupu je předpokládaná doba evakuace stanovena $t_u = 1,19$ min a doba zakouření $t_e = 2,28$ min ($t_u < t_e$ – vyhovuje).

Při užití numerického modelu lze zohlednit přesné rozložení osob po oddělení, behaviorální vlastnosti osob, jejich mobilitu, manipulační prostor, který potřebují při úniku (běžný pacient, pacient na lůžku, pacient o berlích) i míru soběstačnosti/potřeby asistence. Díky tomu, že model nepřistupuje k posouzení evakuace jako k homogenní skupině osob, tak doba evakuace stanovená normovým výpočtem a prostřednictvím pokročilého modelu evakuace osob se liší.

V rámci analýzy evakuace byla modelována celá řada kombinací těchto parametrů. Jako názorná ukázka je příklad viz Obr. 3, kde jsou vyobrazeny stavy evakuace v čase 150 s pro varianty kombinace pacientů na lůžku (nesamotné pohybu) a pacientů samotných pohybu bez nebo s kompenzační pomůckou - 80:20 a 20:80. V případě modelu evakuace je $t_u = 10,02$ s (varianta 80:20), resp. 3,8 s (varianta 20:80), pro hladinu spolehlivosti P95. Propojením výstupů modelu evakuace a modelu požáru je možné stanovit vývoj a míru zakouření v průběhu času a vliv na zbývající osoby v těchto prostorech.



Obr. 3 Vývoj zakouření (vlevo) a evakuace osob, 150 s - pro poměr samostatných a nesamotných pacientů – 80:20 (ve středu) a 20:80 (vpravo).

4 DISKUSE

V případě takto specifického provozu jako je například lůžkové oddělní místo, kde se může vyskytovat velký počet osob neschopných samostatného pohybu, je například velmi důležité detailně tento evakuační proces naplánovat, nejen z pohledu nutné asistence při samotné evakuaci, ale již v provozní fázi při rozmístování pacientů po oddělení. Samotný výsledek vývoje požáru, toxicity a zakouření v čase je názornou představou nejen pro samotný návrh, ale také plánování případné evakuace, výcvik personálu a pro plánování zásahu IZS. Velkou výhodou numerických modelů je možnost opakovaného ověřování velkého množství variant a vstupních scénářů, díky kterým je možné docílit optimalizovanému řešení, jak z pohledu materiálového řešení, odstranění kritických míst, rozmístění osob po oddělení a naplánování zásahu.

V rámci numerického modelování lze do modelu zanést celou řadu požárních scénářů a jejich charakteristik, na které je následně na základě výsledků možné reagovat změnou návrhu. Zmírňované charakteristiky odrážejí reálné situace, které mohou nastat - např. při požáru lůžkového oddělení, pro požár lze specifikovat konkrétní hořlavé látky, které se zde vyskytují a jejich množství. Dále pak i rozmístění pacientů v rámci oddělení, jejich procentuální rozdělení dle mobility a počet asistenčních pracovníků, dělení objektu do požárních úseku, umístění CHÚC a evakuačních výtahů v rámci podlaží, ale také například rozšíření požáru v rámci oddělení, v důsledku, kterého dojde k odříznutí jedné z evakuačních cest. Přinášejí odpovědi a informace, nad rámec běžného normového posouzení a jejich sestavení vychází z inženýrské zkušenosti samotného tvůrce modelu.

5 ZÁVĚR

Inženýrský přístup v rámci požárně bezpečnostního řešení staveb má uplatnění ve všech dílčích oblastech jako je modelování vývoje požáru, posuzování spolehlivosti konstrukcí, tak i při posuzování evakuaci osob. Jak bylo ukázáno výše, je minimálně stejně efektivní a použitelný jako samotný normový přístup. Je možné analyzovat posuzovaný scénář v širším kontextu a v průběhu času nad rámec normového posouzení. Inženýrský přístup přináší nové možnosti komplexního posuzování atypických návrhů vymykajících se konvenčnímu přístupu.

V návaznosti a na rozvoj stavebnictví, nových technologických postupů a materiálové řešení staveb je logickým budoucím záměrem inovace v současnosti využívaných analytických metod požárně bezpečnostního posouzení a standardizace využití numerických modelů evakuace osob a šíření požáru u specifických staveb, jak do obsazenosti, rozlohy, tak i provozu.

Použité zdroje

- [1] XU, Mingbiao; PENG, Dehong. PyroSim-Based Numerical Simulation of Fire Safety and Evacuation Behaviour of College Buildings. Journal homepage: <http://iijeta.org/journals/ijssse>, 2020, 10.2: 293-299."
- [2] ZHANG, Qiangjun, et al. Fire Safety Assessment of Epoxy Composites Reinforced by Carbon Fibre and Graphene. *Applied Composite Materials*, 2020, 27.5: 619-639.
- [3] WEISHEIM, Waldemar, et al. Numerical model for the fire protection performance and the design of intumescent coatings on structural steel exposed to natural fires. *Journal of Structural Fire Engineering*, 2019.
- [4] WEGRZYŃSKI, W.; SULIK, Paweł. The philosophy of fire safety engineering in the shaping of civil engineering development. *Bulletin of the polish academy of sciences. Technical sciences*, 2016, 64.4.
- [5] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd Edit. Quincy: National Fire Protection Association, 2002. ISBN 087765-451-4.
- [6] HURLEY, Morgan J.; ROSENBAUM, Eric R. Performance-based design. In: SFPE handbook of fire protection engineering. Springer, New York, NY, 2016. p. 1233-1261. *New Zealand Building Code*
- [7] ISO TS 16733 Fire safety engineering - Selection of design fire scenarios and design fires
- [8] INSTA 950 Fire Safety Engineering – Comparative method to verify fire safety design in buildings, Svíden
- [9] Zákon č. 183/2006 Sb.: Zákon o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon) ve znění pozdějších předpisů.
- [10] Zákon č. 500/2004 Sb., správní řád, ve znění pozdějších předpisů,
- [11] Vyhláška č. 23/2008 Sb.: Vyhláška o technických podmínkách požární ochrany staveb.
- [12] Vyhláška č. 246/2001 Sb.: Vyhláška Ministerstva vnitra o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci).
- [13] Zákon č. 133/1985 Sb.: Zákon České národní rady o požární ochraně
- [14] POKORNÝ, Petr a Jiří JIŘÍ. Metodika pro specifické posouzení vysoce rizikových podmínek požární bezpečnosti s využitím postupů požárního inženýrství: Projekt – Specifické posouzení vysoce rizikových podmínek požární bezpečnosti s využitím postupů požárního inženýrství Kód projektu VG20122014074 [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2018-08-09].
- [15] OKŘINOVÁ, Petra. Analýza bezpečnosti metra s využitím modelu evakuace osob a šíření požáru [online, IS FAST]. Brno, 2018 [cit. 2020-03-01]. Teze - Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Tomáš Apeltauer.
- [16] ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty.
- [17] ČSN 73 0835 Požární bezpečnost staveb – Budovy zdravotnických zařízení.
- [18] ČSN 73 0810 Požární bezpečnost staveb – Společné požadavky.

- [19] ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty.
- [20] ČSN 73 0810 Požární bezpečnost staveb – Společné požadavky.
- [21] APELTAUER, Tomáš, Petr BENEŠ, Jiří APELTAUER a Petra OKŘINOVÁ. Metodika využití pokročilých modelů požáru a evakuace v požárně bezpečnostním řešení staveb: Projekt s názvem: Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb [online].

ZASTREŠENE RUÍN V ARCHITEKTONICKÝCH KONTEXTÁCH

RUIN COVER STRUCTURES IN ARCHITECTURAL CONTEXTS

Martin Poliak^{*,1}

*martin.poliak@stuba.sk

¹Katedra architektúry, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 8810 05 Bratislava

Abstrakt

Prípady zastrešovania ruín nie sú celkom bežné – objekt, ktorý stratil svoju primárnu funkciu a podľahol deštrukcii, musí dostať nový dôvod jeho opätovného použitia. Zastrešenie narušeného objektu, ktorý časom nadobudol aj hodnotu exponátu, si vyžaduje atypické riešenia nielen z konštrukčného, ale aj z architektonického hľadiska. Témou sa zaoberalo viacero výskumov, architektonickú stránku návrhu však zhodnocovali skôr okrajovo – zastrešenie ruín na Slovensku je realizované najmä s dôrazom na ochranu ruiny pred klimatickými vplyvmi. V zahraničí je však situácia iná. Príspevok ilustruje možné prístupy k prekryvaniu ruín v zahraničí ako inšpiráciu pre použitie aj v našom kultúrnom kontexte a sústreďuje sa na architektonicko-urbanistické determinanty ich riešenia.

Kľúčové slová

Zastrešenie ruiny, ochranná konštrukcia ruiny, krycia konštrukcia ruiny, architektúra zastrešenia ruín, kontext zastrešenia ruín

Abstract

Cases of ruin coverage are not common - an object that lost its primary function and fell into decay must get a new reason for its reuse. Coverage of such object with value of exhibit gained over time requires atypical solutions of both structural and architectural issues. Several researches aimed at the topic with their focus on other than architectural part of the problem - roofs over ruins are raised particularly for reason of protection against climatic conditions on our domain. Situation differs abroad. This paper illustrates foreign approach to coverage of ruins as an inspiration to use in our cultural context and lays its focus on architectural and urbanistic determinants of the topic.

Key words

Roof over ruin, protective structure of ruin, cover structure of ruin, architecture of ruin sheltering, contexts of ruin sheltering

1 ÚVOD

Zastrešovanie ruín v zahraničí je oveľa častejšie ako na Slovensku. Ruiny sa prekryvajú z dôvodu ich funkčnej adaptácie, alebo dôvodu ochrany a prezentácie hodnôt, ktoré ruina predstavuje. Príspevok nadväzuje na teóriu zastrešovania ruín stanovenú danými výskumnými úlohami, ktoré na danú tému boli v nedávnej minulosti spracované. Predkladá samostatný prieskum najaktuálnejších realizácií zastrešení ruín (najmä v zahraničí). Diela sú skúmané z hľadiska stanovených determinantov, formujúcich architektonický výraz nového zásahu.

2 TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ

„Ruina je stavba, ktorá stratila konštrukcie tvoriace jej prirodzenú ochranu ..., čím je vystavená negatívnym atmosférickým vplyvom. ... Je to stavba, ktorá prestala plniť svoju funkciu, prestala byť ochranou pre ľudské aktivity a z ktorej začalo postupne ubúdať až po jej úplný zánik. [1]“ Problematike jej obnovy a prezentácie aj s možnosťou zastrešenia sa venovala J. Gregorová [2], [3]. Zastrešovanie ruín ako citlivá téma ich pamiatkovej

ochrany je rozoznaná aj architektonicko-historickými výskumníkmi [4], [5]. Podrobne tému rozpracovala L. Chovancová vo svojej dizertačnej práci, z ktorej príspevok ťažiskovo čerpá typológiu zastrešenia ruín a hlavné determinanty ich návrhu [6].

Základnými determinantami ovplyvňujúcimi zastrešenie ruiny sú determinanty (i) prírodné a spoločenské, definujúce klimatický a kultúrny kontext ruiny, (ii) urbanistické v zmysle diktátu okolitého prostredia ruiny, ktoré môže byť krajinné, či sídelné, a v rámci ktorých môže byť ruina exponovaná, alebo neexponovaná - prerastená vegetáciou, či začlenená do okolitej výstavby, (iii) architektonicko-konštrukčné, rozoznávajúce mieru zachovania pôvodného objemu ruiny a mieru podľaŕhnutia deštruktívnym mechanizmom, ktoré môžu rozhodnúť o schopnosti ruiny prijať ďalšie zaťaženie, (iv) pamiatkové a legislatívne determinanty v zmysle rozoznania komplexu hodnôt, ktorými ruina disponuje, a v direktívnosti ich ochrany.

Miera zachovania ruiny vyjadruje pomer medzi zachovanou pôvodnou substanciou ruiny k jej pôvodnému objemu, alebo jeho vedeckej rekonštrukcii. Objektívne kategorizuje ruiny bez ohľadu na ich stavebný vývoj počas ich fungovania ako budov a komplexnú aktivitu mechanizmov vedúcu k ich súčasnému degradovanému stavu. Mieru zachovania ruiny možno odstupňovať – ruina môže byť (i) zachovaná so strešnou konštrukciou alebo jej fragmentom, (ii) zachovaná po korunnú rímsu, (iii) zachovaná s múrmi s výškou dostatočnou na vytvorenie disponibilného priestoru v ich interiéri, (iv) zachovaná s nízkymi múrmi, (v) zachovaná v pätách murív, alebo (vi) zachovaná pod súčasnou niveletou terénu a v lepšom prípade rozoznateľná atypom v terénnej konfigurácii, či vo výške a druhu zelene, prípadne vyskúmateľná archeologickými metódami.

Typológiu zastrešenia ruín možno rozdeliť do troch kategórií – (i) krycie konštrukcie nad ruinami, alebo ich celými areálmi, (ii) ochranné konštrukcie položené priamo na ruine a (iii) ochranné konštrukcie vložené do ruiny, tzv. kontajnerov.

3 METODIKA

Na vybraných zahraničných architektonických webových portáloch so širokou databázou projektov bol vykonaný prieskum realizácií zastrešenia ruín. Základnou podmienkou pre zaradenie realizácie do prieskumu bol súvis zastrešenia so skutočnou ruinou, projekt sa teda nejednal nadstavby fungujúcej budovy vo fáze jej užívania, alebo adaptácie objektu na jeho funkčnú zmenu a odhalenia častí konštrukcií, ktoré v konečnom dôsledku môžu vyvolávať dojem zastrešovania ruiny. Druhou podmienkou bol profit interpretácie a stavebno-technického stavu ruiny z pridaných konštrukcií – tie chránili ruinu pred pôsobením škodlivých vplyvov vonkajšieho prostredia, alebo spomaľovala ich pôsobenie, alebo napomáhala stabilite ruiny.

Pozorovaná bola miera zachovania ruiny a poloha zastrešenia voči nej, podľa ktorej bolo zastrešenie zaradené do typologického druhu. Ďalšími sledovanými kvalitami bol typ prostredia, v ktorom sa ruina nachádza, jej exponovanosť a vzťah jej nivelety s okolitým terénom. Obvodovým stenám – ak ochranná konštrukcia, alebo krycia stavba nejakej mala – bol pridelený konštrukčný systém, sledovaný bol konštrukčný materiál nosnej časti konštrukcie stien a striech.

Medzi menej exaktnými sledovanými kvalitami bol postoj novej architektúry definovanej vzťahom nového zastrešenia a ruiny k okolitému prostrediu, v ktorom sa nachádza, funkcia nového priestoru vytvoreného zastrešením a pozícia ruiny v ňom a práca zastrešenia s priestorovými kvalitami východiskového stavu ruiny.

4 VÝSLEDKY

Prieskum zozbieral 120 zahraničných realizácií stavieb a konštrukcií v dotyku s ruinami. Spolu ich tvorí 33 krycích stavieb nad ruinami, alebo ich areálmi, 56 ochranných konštrukcií položených priamo na ruine a 31 ochranných konštrukcií vložených do ruiny – kontajnerov.

Krycie stavby sa vyskytli vo všetkých typoch urbanistického prostredia (Obr. 1, Obr. 2, Obr. 3). Na architektonický návrh stavby výrazne vplýval urbanistický kontext, nakoľko prekrývané ruiny sú zväčša nízkej miery zachovania a pôvodný historický kontext zanikol spolu s väčšinou ich pôvodného objemu. Ruiny sa nachádzali v rôznej nivelete vzhľadom k okolitému terénu a preberajú funkciu historického dokumentu a exponátu. Novostavby nad nimi mali funkciu priamo súvisiacu s touto skutočnosťou, prípadne sa ruina stala súčasťou širšej expozície, alebo funkcia krycej stavby nesúvisela s exponátom ruín vôbec a stavba ruinu neprezentovala.



Obr. 1 Krycia stavba nad ruinou v prírodnom prostredí – vľavo realizácia od AIX Arkitekter 2018, Švédsko [7], vpravo od Goczolowie Architektki 2013, Poľsko [8].



Obr. 2 Krycia stavba nad ruinou v mestskom prostredí – vľavo realizácia od Kostrenčić-Krebel 2013, Chorvátsko [9], vpravo od Amann-Cánovas-Maruri 2012, Španielsko [10].



Obr. 3 Krycia stavba nad ruinou v historickom prostredí – vľavo realizácia od GTRF Tortelli Frassoni Architetti Associati 2013, Taliansko [11], vpravo od Savioz Fabrizzi Architectes 2010, Švajčiarsko [12].

Kontext okolitého prostredia ochranných konštrukcií položených priamo na ruine hral menej významnú rolu v riešeníach zastrešení, nakoľko ten bol striktno historický a nadiktovaný ruinou, na ktorej bolo zastrešenie položené. Ochranná konštrukcia položená priamo na ruine okrem priradenia funkcie exponátu ruine obnovuje jej pôvodnú nosnú funkciu a ruina sa stáva riadnym a živým členom konštrukčného systému. Architektonické riešenie ochrannej konštrukcie je často postavené na tektonických charakteristikách zaniknutého pôvodného zastrešenia. Väčšina nových konštrukcií je z ľahkých konštrukčných materiálov a je evidentná tendencia k ich návratnosti. Strešná konštrukcia je na ruine položená bezprostredne (Obr. 4), alebo cez dištančný článok rôzneho konštrukčného riešenia a vzťahu k rozvoľnenej siluete koruny murív ruiny (Obr. 5).



Obr. 4 Ochranná konštrukcia položená priamo na ruine – vľavo realizácia od Witherford Watson Mann 2013, Spojené Kráľovstvo [13], vpravo od Ferran Vizoso 2013, Španielsko [14].



Obr. 5 Ochranná konštrukcia položená na ruine cez dištančný článok – vľavo kolektívna realizácia 2014, Bulharsko [15], vpravo od BSA 2015, Španielsko [16].

Urbanistický kontext ochranných konštrukcií vložených do ruín, tzv. kontajnerov, je vymedzený samotnou ruinou podobne ako v predošlom type zastrešení. Ruina preberá iba funkciu exteriérového exponátu. Kontajner môže objem, ktorým ruina prirodzene disponuje, rešpektovať, alebo ho presahovať (Obr. 6). Aj napriek samonosnosti vlozenej architektúry táto môže dbať na historický kontext ruiny a môže ho obnovovať, alebo naznačovať (Obr. 7).



Obr. 6 Ochranná konštrukcia vložená do ruiny – vľavo realizácia od NRJA 2002, Litva [17], vpravo od Granada Garcés Arquitectos 2018, Kolumbia [18].



Obr. 7 Ochranná konštrukcia vložená do ruiny – vľavo realizácia od WT Architecture 2014, Spojené Kráľovstvo [19], vpravo od SAMI Arquitectos 2015, Pico [20].

5 DISKUSIA

V priereze skúmaných realizácií zatešenií ruín sa vyskytlo niekoľko spoločných architektonických motívov, ktoré presiahli objektívne rámce nastavené rozoznávanými determinantmi riešenií zatešenií ruín. Reprezentujú subjektívnu potrebu autora priniesť do návrhu zatešenií novú kultúrnu vrstvu.

Nové impulzy vnáša vzťah ku kontextu, v ktorom sa môže miera odlišenia ruiny voči okolitému tektonickému, či prírodnému prostrediu rôzne interpretovať. V tejto súvislosti je možné vnímať motív kontrastu novej konštrukcie, ktorého využitie môže znamenať upozornenie na polohu ruiny a zvýšenú koncentráciu predstavovaných historických hodnôt v širšej prírode, či v kolorite zástavby súčasného heterogénneho, alebo historického charakteru – porovnaj ľavý a pravý stĺpec v Obr. 1, Obr. 2 a Obr. 3.

Druhým architektonickým motívom je svetlo. Nová konštrukcia, či stavba môže ruine prinavracaať približné kvality jej pôvodného funkčného stavu, alebo nová konštrukcia môže ťažiť z východiskového stavu ruiny a novými kvalitami, ktorými disponuje, či už to je presvetlenie, alebo veľkopriestorovosť a dispozičná voľnosť interiéru získaná stratou jeho pôvodných interiérových väzieb – porovnaj ľavý a pravý stĺpec v Obr. 4 a Obr. 5.

Dalším motívom je autonómia – téma, ktorá prerastá všetkými typologickými druhmi zatešenií. Evidentná je autonómia konštrukčná, súvisiaca s polohou zatešenií voči ruine, možno ju však hľadať aj v práci s urbanistickým kontextom a architektonickým výrazom a nájsť ju aj v tak limitujúcej polohe novej architektúry akou je jej vloženie do ruiny – porovnaj ľavý a pravý stĺpec v Obr. 6 a Obr. 7.

6 ZÁVER

V predošlých výskumoch sú nové zatešenií ruín skúmané z hľadiska miery zachovania ruiny, jej stavebno-technického stavu a metódy pamiatkovej obnovy. Architektonickými kritériami výrazne zasahujúcimi do návrhu zatešenií sú aj iné kvality, presahujúce objektívny rámec nastavený danými výskumami, kvality menej objektívne ako inovatívnosť, či kreativita, ktoré výsledné stvárnenie zatešenií ovplyvňujú taktiež významnou mierou.

Príspevok túto skutočnosť ilustruje na základe niekoľkých architektonických motívov, naznačujúcich neobmedzenosť architektonickej tvorby v limitujúcom prostredí akým je kontext ruín. Naopak príspevok potvrdzuje povinnosť reagovania a pracovania nových zatešenií ruín s okolitými urbanistickými kontextami, aj napriek orientácii ich hlavnej funkčnej náplne na ochranu a prezentáciu hodnôt ruiny.

Použitá zdroje

- [1] RIZZI, Gionata. Preface. ASHURST, John. Conservation of Ruins. Oxford: Elsevier Limited, 2007, xix-xxiii. ISBN 978-0-75-066429-5.
- [2] GREGOROVÁ, Jana. Prezentácia architektonického dedičstva: Aplikácia pri torzách architektúry. Bratislava, 2001. Habilitačná práca. Fakulta architektúry, Slovenská technická univerzita v Bratislave.
- [3] VOJTEKOVÁ, Eva, Jana GREGOROVÁ a František KALESNÝ. Application of Reversible Transparent and Translucent Structures in Monument Restoration of Buildings and Areal. In: Architecture in Perspective 2018: Sborník příspěvků z mezinárodní konference. Ostrava: Vysoká škola báňská -

- Technická univerzita Ostrava, 2018, s. 209-212. ISBN 978-80-248-4236-3.
- [4] RAZIM, Vladislav. Zříceniny hradů a městské hrady v současné praxi památkové péče. Památky středních Čech. Praha: Národní památkový ústav, 2010, 24(2), 10-60. ISSN 0862-1586.
- [5] ŠIMKOVIČ, Michal. Metodika obnovy hradných zrúcanín na základe skúsenosti uplynulých 20 rokov. Monument Revue: Časopis na propagáciu vedeckého poznávania pamiatkového fondu Slovenska. Bratislava: Pamiatkový úrad Slovenskej republiky, 2020, 9(1), 14-29. ISSN 1338-807X.
- [6] CHOVANCOVÁ, Lýdia. Krycie konštrukcie torz architektúry (ochranné konštrukcie a krycie stavby torz architektúry). Bratislava, 2017. Dizertačná práca. Fakulta architektúry, Slovenská technická univerzita v Bratislave.
- [7] Triangular Timber Roof Shelters the Ruins of Sweden's Oldest Church. Dezeen [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné na internete: <https://www.dezeen.com/2018/01/29/varnhem-abbey-aix-arkitekter-triangular-timber-roof-ruins-oldest-church-sweden/#/>
- [8] Goczolowie Architekci, Ovo Grabczewscy Architekci. Krasiejow Paleontological Pavilion. Divisare [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné na internete: <http://divisare.com/projects/299027-goczolowie-architekci-ovo-grabczewscy-architekci-krasiejow-paleontological-pavilion>
- [9] Petar Zoranić Square and Šime Budinić Plaza / Kostrenčić-Krebel. ArchDaily [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné na internete: <http://www.archdaily.com/478606/petar-zoranic-square-and-sime-budinic-plaza-kostrencic-krebel>
- [10] Amann Cánovas Maruri: Roof for Molinete Roman Ruins. Designboom [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné na internete: <http://www.designboom.com/architecture/amann-canovas-maruri-roof-for-molinete-roman-ruins/>
- [11] GTRF Tortelli Frassoni Architetti Associati. Aula Di Cromazio E Piazze Della Basilica Di Aquileia. Divisare [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné na internete: http://divisare.com/projects/266833-gtrf-tortelli-frassoni-architetti-associati-orsenigo_chemollo-aula-di-cromazio-e-piazze-della-basilica-di-aquileia
- [12] Coverage of Archaeological Ruins of Abbey of St. Maurice. Savioz Fabrizzi Architectes [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné na internete: <http://www.sf-ar.ch/architect/coverage-archaeological-ruins-abbey-st-maurice-8.html?idm=51>
- [13] Astley Castle. Witherford Watson Mann Architects [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné na internete: <http://www.wwmarchitects.co.uk/projects/astley>
- [14] Ferran Vizoso. Huge Skylight Church. Divisare [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné na internete: <http://divisare.com/projects/233700-ferran-vizoso-jose-hevia-huge-skylight-church>
- [15] Conservation, Restoration and Adaptation of Church "St. Paraskeva" / Todor Mihaylov, Elitsa Andreeva, Emilia Kaleva, Aleksandra Vadinska. ArchDaily [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné na internete: http://www.archdaily.com/573012/conservation-restoration-and-adaptation-of-church-st-paraskeva-te-architects?ad_source=search&ad_medium=search_result_projects
- [16] Monastery of San Juan Cover / BSA. ArchDaily [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné na internete: http://www.archdaily.com/783820/cubierta-monasterio-de-san-juan-bsa?ad_source=search&ad_medium=search_result_all
- [17] House of Ruins (Drupas) / NRJA. ArchDaily [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné na internete: http://www.archdaily.com/14450/house-of-ruins-drupas-nrja?ad_source=search&ad_medium=search_result_all
- [18] Fragments – Counter Monument / Granada Garcés Arquitectos. ArchDaily [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné na internete: http://www.archdaily.com/919792/fragments-nil-counter-monument-granada-garcés-arquitectos?ad_source=search&ad_medium=search_result_all
- [19] The Mill / WT Architecture. ArchDaily [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné na internete: <http://www.archdaily.com/623555/the-mill-wt-architecture>
- [20] E/C House by SAMI Arquitectos, Concrete Walls Within Dark Basalt Stone Ruins. Bigmat International Architecture Agenda [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné na internete: <http://www.bmiaa.com/ec-house-sami-arquitectos-concrete-wall-within-dark-basalt-stone-ruins/>

VLIV ČASOVÝCH INTERVALŮ MIKROVLNNÉHO VYSOUŠENÍ ZDIVA NA KONEČNÝ VÝSLEDEK VYSOUŠENÍ

INFLUENCE OF TIME INTERVALS OF MICROWAVE DRYING OF MASONRY ON THE FINAL RESULT OF DRYING

Vendula Kvapilová^{*,1}

*kvapilova.projekce@gmail.com

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno-střed

Abstrakt

V oblasti vysoušení vlhkého zdiva je již známá a diskutovaná metoda mikrovlnného vysoušení zdiva. Tato metoda je nedestruktivní, a také proto se uvažuje s jejím využitím v oblasti památkově chráněných objektů. Přestože již bylo provedeno několik výzkumů na toto téma, nemáme odpovědi na všechny otázky ohledně konkrétních metodických postupů. Příspěvek je zaměřen na vliv časových intervalů mikrovlnného vysoušení na výsledek vysoušení zdiva. Experiment byl proveden na historickém zdivu z CPP a na keramickém zdivu. Byly zhotoveny dva laboratorní vzorky z každého druhu zdiva, na nichž bylo aplikováno mikrovlnné vysoušení zdiva, a to v odlišných časových intervalech. Odlišná byla nejen doba sušení, ale také doba přestávek mezi nimi. Cílem experimentu je stanovit ideální interval vysoušení.

Klíčová slova

Mikrovlnné vysoušení zdiva, historické zdivo, sanace zdiva, časový interval, vlhkost

Abstract

In the field of wet masonry drying, a method of microwave masonry drying is known. This method is non-destructive, and therefore its use in the field of listed buildings is being considered. Although several studies have been done, we don't have the answers to all the questions about specific methodological procedures. The paper focuses on the influence of microwave drying time intervals on the result of masonry drying. The experiment was performed on historical masonry from CPP and on ceramic masonry. Two laboratory samples were made from each type of masonry, on which drying of the masonry was applied, at different time intervals. Not only was the drying time different, but also the break time between them. The aim of the experiment is to determine the ideal drying interval.

Key words

Microwave drying of masonry, historic masonry, rehabilitation of masonry structures, time interval, humidity

1 ÚVOD

Principem mikrovlnného vysoušení je schopnost rozkmitat molekuly vody ve hmotě zdiva a následný vznik tepla, který se vytvoří jejich pohybem a třením, způsobí jejich přeměnu na vodní páru. Taktto přeměněná vodní pára už se následně jen odvětrá z konstrukce. Tímto procesem umožníme molekulám vody zbavit se jejich energetického potenciálu, který je váže na kapiláry ve stavebním materiálu a znemožňuje jejich odpařování. Teplota vody je vyšší než teplota vlastní stavební látky a bylo zjištěno, že prohřívání narůstá od středu látky, respektive v okolí antén přístroje je největší. Prohřívaná oblast se pak zvětšuje tak, že již odstraněná vlhkost dovoluje rozšířit působnost záření.

Z výše uvedeného vyplývá jasná souvislost mezi časovými intervaly vysoušení zdiva a samotným vypařováním vlhkosti z konstrukce. V případě příliš dlouhé doby vysoušení zdiva a krátkých přestávek může dojít k přehřátí zdiva, což je nežádoucí a může znehodnotit výsledek práce. Stejně tak krátká doba vysoušení v kombinaci s příliš dlouhou přestávkou mezi jednotlivými sušicími cykly může směřovat k nedostatečnému výslednému efektu mikrovlnného vysoušení.

Cílem experimentu je stanovit ideální dobu sušení a také přestávku mezi jednotlivými sušícími cykly, a to pro dosažení maximální účinnosti metody mikrovlnného vysoušení zdiva. Tento experiment byl proveden na vzorcích zdiva z historických CPP a také na zdivu z moderních tvarovek typu Therm [1], [2], [3], [5].

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Na téma mikrovlnného vysoušení zděných konstrukcí bylo provedeno již několik relevantních výzkumů a experimentů, spousta z těchto prací byla uskutečněna na Fakultě stavební v Brně. Konkrétní vazba mezi intervalem sušení a výsledným efektem mikrovlnného vysoušení nebyla prozatím přesně stanovena.

3 METODIKA

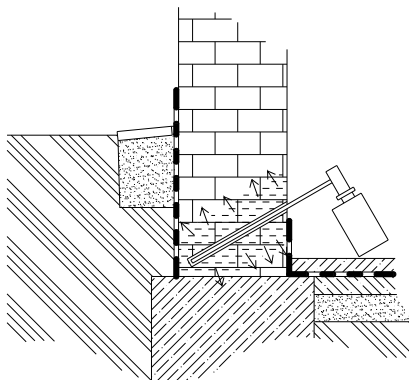
Zkoušky byly provedeny na dvou vzorcích historického zdiva z cihel plných pálených a také na dvou vzorcích zdiva z keramických tvarovek typu Therm, zdění proběhlo na maltu vápenocementovou P 2,5. Rozměr jednotlivých vzorků zdiva 1000 x 300 x 500 (d, š, v – mm). Vzorky zdiva byly zhotoveny do dvou plastových namáčecích van, do každé vany vždy vzorky ze stejného typu zdiva. Takto zhotovené vzorky byly týden ponechány v laboratorních podmínkách s vnitřní teplotou vzduchu 23°C a relativní vlhkostí vzduchu 55 %. Následně po jednom týdnu od vyzdění se provedlo vyvrtání injektážních otvorů po osové vzdálenosti 100 mm, a to vrtákem průměru 24 mm. Vrt musí procházet alespoň jednou ložnou spárou. Jednotlivé vrty jsou situovány vodorovně a pro historické zdivo byly zhotoveny ve výšce 220 mm, tj. mezi třetí a čtvrtou vrstvou cihel a pro zdivo z keramických tvárnic byly vrty umístěny ve výšce 270 mm, tj. ve druhé tvarovce nad první ložnou spárou. Následně došlo k očištění otvorů stlačeným vzduchem.

Do takto připravených namáčecích van s jednotlivými vzorky byla načerpána voda do výšky hladiny přibližně 150 mm. Po jednom měsíci, kdy bylo pozorováno vzlinutí vody po výšce zdiva, bylo uskutečněno měření vlhkosti a následně mikrovlnné vysoušení vzorků zdiva.

Mikrovlnné vysoušení proběhlo pomocí přístroje s tyčovou anténou, a to vždy přibližně v polovině zdiva. K experimentu byly použity dvě tyčové antény o výkonu 600 W. Sestava antén umožňuje rovnoměrné šíření mikrovlnné energie po celé délce vyvrtaného otvoru a tím také zajišťuje stejnoměrné prohřívání okolí antén. Tímto způsobem je vytvořen tlakový směr růstu energie, jež pozitivně působí na přesun vody za prohřívanou oblast. Voda je takto vytlačována za vysoušenou oblast zdiva tlakem pomoci vodní páry, která se dostává ven z konstrukce zdiva především těmi otvory, v nichž jsou osazeny antény.

Délka vysoušení u prvních vzorků od každého druhu zdiva činila 5 cyklů po 14 minutách, tedy 12 minut vysoušení a 2 minuty přestávka. Délka vysoušení u druhých vzorků od každého druhu zdiva činila 5 cyklů po 20 minutách, tedy 17 minut vysoušení a 3 minuty přestávka. Měření vlhkosti proběhlo gravimetrickou metodou, a to jak na začátku experimentu, tak během jednotlivých sušících cyklů. V průběhu experimentu je sledován také vnější vzhled zdiva, vlhkostní mapy a případný výskyt solí na povrchu zdi.

Výsledkem pokusu bude stanovení množství vlhkosti ve zdivu v závislosti na odlišném časovém intervalu vysoušení jednotlivých vzorků a vzájemné porovnání konečné vlhkosti těchto vzorků, dále pak celkové zhodnocení ideální doby sušícího cyklu [4], [6], [7].



Obr. 1 Schéma vysoušení zdiva tyčovou anténou.

4 VÝSLEDKY

V průběhu mikrovlnného vysoušení jednotlivých vzorků byl sledován zejména pokles hmotnosti vzorků v čase vysoušení a z těchto údajů byla následně stanovena hmotnostní vlhkost po každém sušicím cyklu. V následujících tabulkách Tab.1 a Tab.2 jsou zachyceny hodnoty hmotnostních vlhkostí jednotlivých vzorků v čase MW vysoušení.

Pro vysvětlení nutno dodat, že vzorky, jež byly označeny CP20 – cihla plná pálená a T20 – tvárnice typu Therm byly vysoušeny v cyklu dvaceti minut a vzorky s označením CP14 – cihla plná pálená a T14 – tvárnice typu Therm byly vysoušeny v cyklu čtrnácti minut.

Tab.1 Hodnoty hmotnostních vlhkostí v průběhu sušení, sušící cyklus 20 minut.

Označení vzorku	Hmotnostní vlhkost [%]					
	Počáteční	Po 20 min.	Po 40 min.	Po 60 min.	Po 80 min.	Po 100 min.
CP20	13,60	12,81	12,02	11,14	10,28	9,44
T20	21,79	21,06	20,29	19,48	18,62	17,71

Tab.2 Hodnoty hmotnostních vlhkostí v průběhu sušení, sušící cyklus 14 minut.

Označení vzorku	Hmotnostní vlhkost [%]					
	Počáteční	Po 14 min.	Po 28 min.	Po 42 min.	Po 56 min.	Po 70 min.
CP14	14,92	13,91	11,52	10,35	9,17	8,69
T14	19,96	19,01	17,87	16,90	16,02	15,37

Vzhledem k tomu, že z výše uvedených tabulek Tab.1 a Tab.2 vyplývá, že počáteční vlhkost byla u jednotlivých vzorků rozdílná i navzdory použití totožných materiálů – CPP stejného původu, tvárnice typu Therm stejného původu a zdíci malty, je potřeba vyhodnotit skutečný úbytek hmotnosti, resp. vlhkosti. Tento údaj vyplývá z níže uvedených tabulek Tab.3 a Tab.4.

Tab.3 Výsledný úbytek vlhkosti jednotlivých vzorků z CPP.

Celkový úbytek vlhkosti [%]	
CP20	30,59 %
CP14	41,76 %

Tab.4 Výsledný úbytek vlhkosti jednotlivých vzorků z tvarovek typu Therm.

Celkový úbytek vlhkosti [%]	
T20	18,72 %
T14	22,99 %

5 DISKUZE

Navzdory počátečnímu očekávání, že větší hmotnostní úbytek bude u vzorku CP20 a T20, bylo experimentem stanoveno, že celkový úbytek hmotnosti byl větší při stanovení sušícího cyklu na 14 minut, tedy 12 minut sušení a 2 minuty přestávka. Rozdíl úbytku vlhkosti u vzorků z CPP je větší než 10 %.

Než budou stanoveny konečné závěry je nutno diskutovat nad otázkou stejnorodosti konstrukce. Vzorky, jež byly zhotoveny z historických cihel jsou stejného původu a vyzděny na totožnou zdíci maltu, avšak vzhledem ke stáří a původnímu umístění cihel je možno se domnívat, že každý vzorek nedosahoval stejných vlastností, což také mohlo způsobit rozdílnou počáteční vlhkost jednotlivých vzorků.

Pomineme-li možné odchylky způsobené nestejnoroostí materiálu CPP můžeme stanovit, že dle provedeného experimentu je výhodné provádět vysoušení po kratších cyklech, a to i navzdory kratším přestávkám mezi jednotlivými cykly.

Dále bylo stanoveno, že úbytek vlhkosti byl větší pro vzorky z historických cihel plných pálených, a to téměř dvojnásobně oproti moderním tvarovkám typu Therm. Důvod tohoto rozdílu je diskutabilní a můžeme se domnívat, že jej má za následek struktura moderních tvárnic – zdvo dutinové.

6 ZÁVĚR

Z provedeného experimentu vyplývá, že lepších výsledků je dosaženo při kratších vysoušecích cyklech, a to i s kratšími pauzami mezi vysoušecími cykly.

Experiment může přispět při dalších výzkumných pracích pro dosažení ideálního výsledku mikrovlnného vysoušení, avšak je doporučeno rozšířit tyto měření, a to buď o další vzorky ke stávajícímu experimentu, případně provést tento experiment také s mikrovlnným zařízením s přílohou trychtýřovou hlavicí a také na dalších typech materiálu.

Použité zdroje

- [1] PAVLÁT, Josef. Vlhkost staveb. Znalecká a investorsko- inženýrská kancelář [online]. Praha, 2014 [cit. 2019-10-1]. Dostupné z: <http://www.pavlat-znalec.cz/nktere-vybrane-otazky-z-problematiky-stavebni-technologie/96-vlhkost-staveb>
- [2] NOVOTNÝ, Miloslav. Problematika využití mikrovlnného záření v pozemním stavitelství: Problems of utilization of microwave radiation in building constructions : teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru Pozemní stavby. Brno: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4354-9.
- [3] SOLAŘ, Jaroslav. Odstraňování vlhkosti: sanace vlhkého zdiva. Praha: Grada, 2013. Profi & hobby. ISBN 978-80-247-4708-8.
- [4] VYSUŠOVÁNÍ ZDIVA, STERILIZACE BIOTICKÝCH ČINITELŮ POMOCÍ MIKROVLNNÉ TECHNOLOGIE. In: SOBOTKA, Jindřich, Zdeněk JIROUŠEK a Karel ŠUHAJDA. XXII. mezinárodní vědecká konference soudního inženýrství Brno 2013. Brno, s. 9.
- [5] James Clerk Maxwell. Archiv historie matematiky MacTutor [online]. Skotsko, 2019 [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: <https://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Maxwell.html>
- [6] ALEXA, Tomáš. ODSTRAŇOVÁNÍ VLHKOSTI VE SPOJOVACÍ MALTĚ MW OHŘEVEM. Brno, 2010. DISERTAČNÍ PRÁCE. FACULTY OF CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT OF BUILDING STRUCTURES. Vedoucí práce Miloslav Novotný.
- [7] SOBOTKA, Jindřich. LIKVIDACE BIOTICKÝCH ŠKŮDCŮ PROSTŘEDNICTVÍM EMW ZÁŘENÍ. Brno, 2015. DISERTAČNÍ PRÁCE. FACULTY OF CIVIL ENGINEERING DEPARTMENT OF BUILDING STRUCTURES. Vedoucí práce Karel Šuhajda.

ZKOUŠENÍ POŽÁRNÍ ODOLNOSTI STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

FIRE RESISTANCE TESTING OF BUILDING STRUCTURES

Tomáš Žajdlík ^{*1}, Karel Šuhajda¹

^{*} zajdlík.t@fce.vutbr.cz

¹ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Při použití konstrukcí ve stavebních objektech musí jednotlivé prvky prokázat vlastnosti požadované návrhem. Jedním z požadavků na konstrukce je jejich požární odolnost. Požadované vlastnosti jsou dány normovými hodnotami dle charakteru objektu a způsobu jeho užívání. Potvrzení o splnění požadovaných hodnot je dáno získáním požárně klasifikačního osvědčení. Prokázání těchto vlastností je možné na základě několika způsobů. Jedním z těchto postupů jsou požární zkoušky. Článek se zabývá zkoušením požární odolnosti konstrukcí objektů pozemních staveb.

Klíčová slova

Požární odolnost, požární zkouška, protipožární retardéry, spalovací komora, dřevěné prvky

Abstract

Every element must meet design requirements for using structures in buildings. One of the requirements is the fire resistance. The required properties are presented in standards and laws according to type and way of using the building. The fulfilment of requirements is declared by resistance to fire classification report. This can be done in several ways. One of them are the fire tests. The article is focused on testing of fire resistance of structures in buildings.

Key words

Fire resistance, fire test, fire retardant, combustion chamber, timber structures

1 ÚVOD

Při návrhu stavebních konstrukcí je nutné postupovat tak, aby byly splněny všechny požadavky, které jsou na výsledné dílo kladeny. Jedním z požadavků je odolnost stavby a jednotlivých konstrukcí na účinky mimořádného zatížení jako je situace za požáru. Prokázání splnění těchto požadavků je vyžadováno před zabudováním stavební konstrukce či prvku do objektu. Metodické postupy pro stanovení požární odolnosti zahrnují určení hodnot na základě výpočtu dle eurokódu, pomocí tabulkových hodnot, na základě výsledků požární zkoušky či pomocí kombinace výpočtů s experimentální zkouškou.

V praxi je pro určení požární odolnosti běžných konstrukcí užíváno tabulkových hodnot jako jeden z nejrychlejších a nejlevnějších způsobů. Hodnoty byly získány na základě výsledků výpočtových metod či praktického měření. Užití těchto hodnot, vzhledem k variabilitě použití, však vykazuje značně konzervativní výsledky. Pro zpřesnění hodnot je možné použít výpočtových postupů pro návrh konstrukcí za mimořádné návrhové situace. Tyto postupy jsou definovány normami a jejich použití je na straně bezpečnosti.

Poslední možností pro získání potřebných hodnot je provedení požární zkoušky. Tento způsob umožňuje získání nejpřesnějších a nejrelevantnějších výsledků. Při zkoušení konstrukcí lze simulovat okrajové podmínky, které co nejvíce vystihují reálné působení v objektu. Při neustálém vývoji stavebních materiálů a konstrukcí je mnohdy požární zkouška jedinou možnou variantou z výše uvedených postupů. Nevýhodou je však její pracnost a časová a finanční náročnost její realizace dle normových postupů. Pro prvotní ověření reakce konstrukce na oheň se nabízí možnost testování vzorku menších rozměrů. Během výzkumu na fakultě na fakultě Worcester Polytechnic Institute v USA byla sestavena zkušební pec s rozměry 1,2 × m 1,2 m × 0,9 m, kde naměřené hodnoty z průběhů zkoušek prokázaly vhodnost této metody pro testování konstrukcí [1]. Se zmenšením rozměrů konstrukce jsou samozřejmě spojeny i nižší náklady na samotný vzorek, stejně jako náklady celkové zkoušky.

2 ZKOUŠENÍ STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

Pro hodnocení odolnosti konstrukcí vůči účinkům požáru jsou konstrukce klasifikovány na základě, již výše zmíněných, mezních stavů (MS) s požární odolností v minutách. Hodnoty jednotlivých kritérií jsou získány z výsledků požárních zkoušek. Pro průběh zkoušky je důležité dodržení předem stanovených postupů, jejichž hlavním parametrem je teplota a tlak, kterému je konstrukce vystavena.

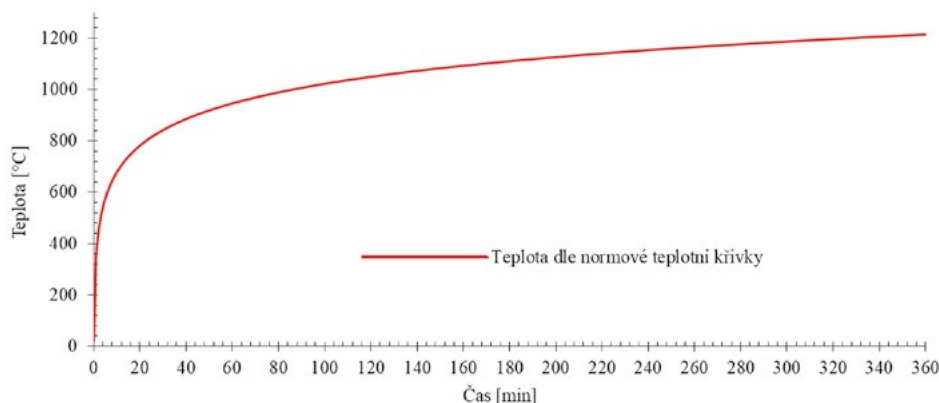
Teplota při zkoušení

Pro zkoušení vnitřních konstrukcí je dán časový průběh teploty při požáru logaritmičtým vztahem. Tento časový průběh byl mezinárodně stanoven na základě statistik a byla určena tzv. normová teplotní křivka T , která je dána vztahem:

$$T = 345 \log_{10} (8t + 1) + 20 \quad (1)$$

kde je T je průměrná teplota v peci [$^{\circ}\text{C}$], t je čas [min].

Normová teplotní křivka teplotní křivka je zobrazena v grafu na Obr. 1.



Obr. 1 Graf průběhu normové teplotní křivky.

Normový průběh zkoušení

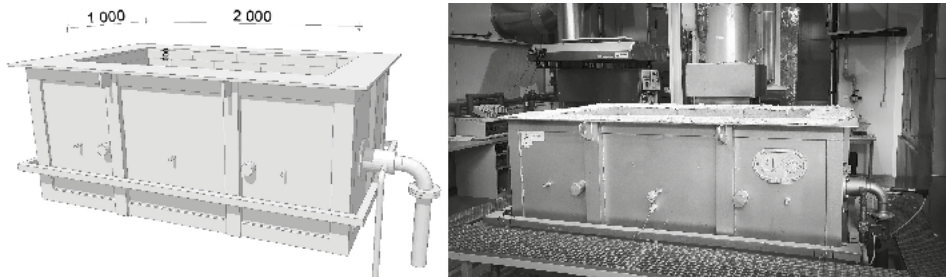
Pro jednotlivé konstrukce jsou normami stanoveny postupy pro zkoušení konstrukcí. Základní požadavky na podmínky při průběhu zkoušky jsou stanoveny dle ČSN EN 1363-1 [2], kde jsou rovněž stanovena kritéria pro následné vyhodnocení zkoušky. Normové postupy jsou členěny dle typu konstrukcí a jejich užití v objektu. Základní vlastností je pak třídění zkušebních postupů pro konstrukce nosné a nenosné.

Pro srovnání požární odolnosti byla vybrána konstrukce vnitřní nenosné stěny. Pro tyto konstrukce je stanoven zkušební postup dle ČSN 1364-1 [3]. Zkoušení požární odolnosti nenosných stěnových konstrukcí je prováděno na vzorcích o rozměrech 3 m \times 3 m. Tyto hodnoty lze upravit na menší v případě, že výsledná konstrukce užitá v praxi, je menší než konstrukce s výše uvedenými rozměry. V takovém případě se ke zkoušení použije skutečný rozměr konstrukce. Konstrukce by měla být zkoušena tak, aby okrajové podmínky zkoušení co nejvíce vystihly reálné podmínky konstrukce v objektu. Vzorek by měl být umístěn do zkušebního rámu a prostory mezi vzorkem a konstrukcí se vyplní pružným materiálem pro zajištění možnosti dilatace konstrukce.

Hlavním sledovaným kritériem je teplota a čas. Tyto veličiny jsou zásadní pro určení výsledné požární odolnosti konstrukce.

Experimentální zkoušení vzorku

Experimentální ověření požární odolnosti vybrané konstrukce bylo provedeno na zařízení umožňující teplotní zatěžování dle normové teplotní křivky s maximální teplotou 1100 °C. Vzhledem k principu dostupného zkušebního zařízení byla konstrukce zkoušena ve vodorovné poloze. Jedná se o malorozměrovou zkoušku s půdorysnými rozměry zkušební plochy 2000 × 1000 mm.



Obr. 2 Zkušební zařízení pro ověření požární odolnosti konstrukce.

Pro srovnání vlastností požární odolnosti byla vybrána konstrukce vnitřní nenosné stěny s dřevěnými konstrukčními prvky. Jako pohledový povrch konstrukce bylo voleno souvrství sádrovláknitých desek s třídou reakce na oheň A2-s1, d0. Akustická a požární izolace stěny byla provedena z minerálních izolačních desek vložených mezi dřevěné sloupky konstrukce.

Konstrukce byla uložena na horní povrch zkušebního zařízení a úložná plocha byla opatřena nehořlavým podkladním materiálem pro utěsnění a vyrovnání nerovností.

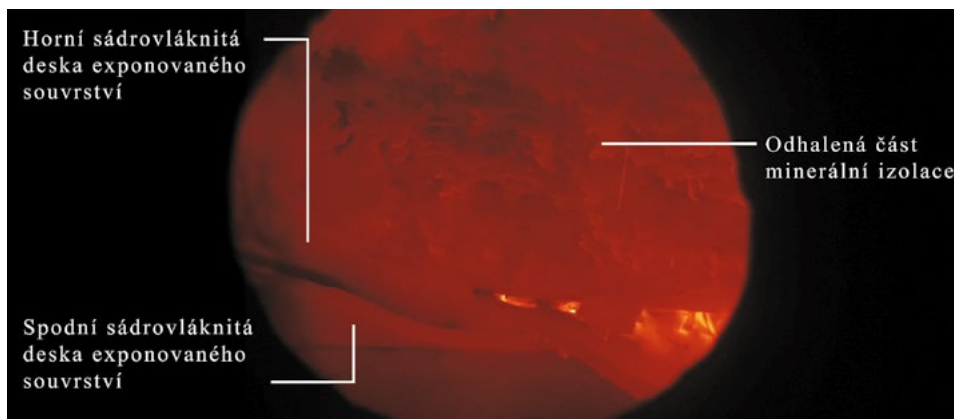
Měření teploty

Zkoušení konstrukce spočívá v jejím teplotním zatěžování s pravidelným snímáním teplot. Časový interval mezi jednotlivými měřeními by neměl přesáhnout 1 minutu. V průběhu zkoušky byly měřeny teploty ve zkušební komoře, na površích zkoušené konstrukce a mezi jejími jednotlivými vrstvami.

Teplotní zatěžování bylo vyvozováno programem zkušebního zařízení dle normové teplotní křivky a teplota uvnitř pece byla měřena pomocí termoelektrických článků. Uprostřed zkoušené konstrukce byl připevněn článek pro snímání teploty na ohříváném povrchu konstrukce.

Průběh teplot uvnitř vzorku byl sledován na rozhraních jednotlivých vrstev ve středním poli vždy pomocí dvojice termočlánků. Další termočlánky byly umístěny na styku opláštění s dřevěnou konstrukcí.

Teplota na neohříváné straně konstrukce byla snímána pomocí mobilního měřidla ve třech bodech na středu jednotlivých polí.



Obr. 3 Fotografie pohledu do zkušební komory v 93. minutě zkoušky.

Na Obr. 3 je patrný stav konstrukce v průběhu zkoušky při 93. minutě. Je zde vidět úplná absence exponovaného souvrství sádrovláknitých desek. Působením vysoké teploty dochází ke zkrěnutí izolantu. Nicméně během požáru minerální izolant nepřispívá k jeho intenzitě, nedochází k jeho vznícení a zvyšuje tak požární odolnost konstrukce.

Interpretace výsledků požárních zkoušek

Výsledné vyhodnocení hodnot a průběhu zkoušky probíhá na základě sledovaných mezních stavů. Pro požárně dělicí konstrukce stěn a stropů jsou nejčastěji sledovanými parametry celistvost (E), izolace (I), radiace – hustota tepelného toku (W) a nosnost (R).

Při sledování kritéria celistvosti si konstrukce po celou dobu musí zachovat své dělicí funkce, aniž by došlo ke vznícení bavlňného polštářku přikládávaného na povrch konstrukce, k umožnění průchodu měřky konstrukcí či k souvislému plamennému hoření. Při sledování kritéria izolace nesmí neexponovaný povrch konstrukce vykazovat přírůstek průměrné teploty vyšší než 140 K nebo přírůstek teploty ve kterémkoliv bodě nad počáteční průměrnou teplotou o více jak 180 K. U kritéria nosnosti je rozhodující rychlost deformace a mezní skutečná deformace.

Nedílnou součástí vyhodnocení konstrukce je určení druhu konstrukční části. V objektech jsou jednotlivé konstrukce většinou složeny z více materiálů o různých třídách reakce na oheň. Kmenové návrhové normy [4] proto třídí výsledné konstrukce v celkové sestavně do 3 základních druhů (DP1, DP2, DP3). Parametry pro zařazení jsou dány normovými požadavky dle užitých materiálů a jejich třídy reakce na oheň v závislosti na uspořádání těchto materiálů v hodnocené skladbě. Konstrukce druhu DP1 nezvyšují v požadované době požární odolnosti intenzitu požáru. Tyto konstrukce sestávají z výrobků třídy reakce na oheň A1 či A2 nebo B až F umístěných uvnitř konstrukčních částí mezi výrobky A1 nebo A2, u kterých nesmí dojít k jejich vzplanutí a není na nich závislá stabilita konstrukce. Stavební konstrukce druhu DP2 nezvyšují v požadované době požární odolnosti intenzitu požáru. Tyto konstrukce mohou být z výrobků B až D, na kterých je závislá stabilita konstrukce, avšak musí být umístěny uvnitř konstrukčních částí mezi výrobky A1 a A2. Případně z výrobků B až F uvnitř A1 či A2 a není na nich závislá stabilita konstrukce. Konstrukce druhu DP3 mohou v požadované době požární odolnosti zvýšit intenzitu požáru a zahrnují podstatné složky, které nespĺňují požadavky na konstrukce DP1 či DP2.

3 VÝSLEDKY ZKOUŠENÍ

Zkouška byla provedena v celkové délce 102 minut. Během této doby byly z jednotlivých čidel v konstrukci a na jejím povrchu zaznamenávány hodnoty naměřených teplot. Průběh zkoušky byl po celou dobu sledován a byly zaznamenávány změny a chování jednotlivých dílčích materiálů a ve výsledku i konstrukce jako celku.

Maximální teplota na neohřívávané straně konstrukce těsně před ukončením zkoušky byla 64,2 °C, což vzhledem k počáteční teplotě vzorku znamená maximální přírůstek přibližně o 44 K.

Průměrná teplota na neohřívávané straně konstrukce těsně před ukončením zkoušky byla 59,6 °C, respektive průměrný přírůstek teploty přibližně o 40 K.

Při měření teplot na povrchu dřevěného sloupku z exponované strany konstrukce začala teplota prudce narůstat okolo 63 minuty od počátku zkoušky. V čase 70 minut se zde teplota pohybovala v hodnotách okolo 600 °C.

4 ZHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Z naměřených hodnot lze vyhodnotit skutečnou požární odolnost dané konstrukce.

Vzhledem k nízkým povrchovým teplotám a neporušenosti povrchu si konstrukce po celou dobu zkoušky zachovávala své vlastnosti pro splnění požadavků kritéria celistvosti (E).

Při ukončení zkoušky, tzn. v čase $t = 102$ minut od zahájení zkoušky, byl průměrný nárůst teploty v měřených místech na povrchu konstrukce oproti počáteční hodnotě přibližně 40 K. Výsledné posouzení $40 \leq 140$ [K] vyhovuje. Tento požadavek je tedy splněn. Maximální nárůst teploty byl přibližně 44 K. Výsledné posouzení $44 \leq 180$ [K] vyhovuje. Dle výše uvedených skutečností konstrukce vyhověla požadavkům izolační schopnosti konstrukce (I).

Vzhledem k dosaženým nízkým teplotám a splnění požadavku pro izolační schopnosti konstrukce byl splněn i požadavek pro limit hustoty tepelného toku (W).

Dle naměřených hodnot a chování konstrukce tak splnila zkoušená skladba požadavky pro kombinaci mezních stavů EI 90, respektive EW 90.

Vzorek byl sestaven jako konstrukce splňující požadavky pro druh konstrukční části typu DP2. Tyto vlastnosti si konstrukce zachovala po dobu, než došlo k porušení exponovaného souvrství nehořlavých deskových materiálů. Na základě této doby byla konstrukce zaříděna jako EI 60 DP2. Od této doby až do 90 minut konstrukce dosáhla výsledných hodnot jako konstrukce typu DP3 (EI 90 DP3).

5 ZÁVĚR

V rámci předložené práce byly popsány způsoby stanovení požární odolnosti stavebních konstrukcí.

Požární zkoušky vykazují přesnější a reálnější výsledky hodnocených konstrukcí oproti konzervativním metodám. Tato skutečnost je však dána na úkor velké finanční náročnosti celého procesu. Zkoušení požární odolnosti a testování výrobků však hraje klíčovou roli při zvyšování odolnosti stavebních konstrukcí a vývoji nových stavebních materiálů pro jejich následné uplatnění v praxi. Optimálních výsledků lze dosáhnout kombinací praktických zkoušek a matematického modelování s výpočtovými metodami. Velké uplatnění při vývoji konstrukcí mají malorozměrové zkoušky vykazující optimální výsledky. Na základě těchto výsledků je možné dále pracovat a optimalizovat konstrukce pro dosažení vyšších odolností. Nové konstrukce je pak nutné podrobit zkouškám dle platných normových postupů pro získání výsledného požárně klasifikačního osvědčení.

Poděkování

Výsledky uvedené v článku byly získány v rámci řešení projektu specifického výzkumu FAST-J20-6467 fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Konstrukce byla zkoušena na zkušebním zařízení výzkumného centra AdMaS, které je součástí Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

Použitá zdroje

- [1] ING, Alexander, Kevin LYNCH, Dylan MARTEL a Tara SHARP. Design of Small-Scale Furnace for Fire Resistance Testing of Building Construction Materials. B.m.: Worcester Polytechnic Institute. 2017
- [2] ČSN EN 1363-1 Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky. Praha: ÚNMZ. 2013.
- [3] ČSN 1364-1 Zkoušení požární odolnosti nenosných prvků – Část 1: Stěny. Praha: ÚNMZ. 2017.
- [4] ČSN 73 0810 Požární bezpečnost staveb - Společná ustanovení. Praha: ÚNMZ. 2016.

ZHODNOCENÍ VLIVU MATERIÁLŮ ŠIKMÉ STŘECHY NA TEPELNOU STABILITU DYNAMICKOU METODOU

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF SLOPING ROOF MATERIALS ON THE THERMAL STABILITY USING THE DYNAMIC METHOD

Ondřej Pilný*

*pilny.o@fce.vutbr.cz

* Ústav pozemního stavitelství, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

Provádění teplosměnných konstrukcí nejen pasivních budov je technicky náročné. Řešení se nabízí v materiálech tepelného izolantu s lepšími tepelně technickými vlastnostmi, nebo jejich vyšších tloušťkách. Toto může vést k problému s přehříváním interiérů. Pasivním řešením je vylepšení měrné tepelné kapacity konstrukcí, zejména exponovaného střešního pláště, což vede ke změně fázového posunu teplotního kmitu a nárůstu energie ukládané do konstrukce. Tím vzniká riziko akumulace tepelných zisků. Předmětem příspěvku je přiblížení této problematiky. Za pomoci idealizovaného modelu vypočteného dynamickou metodou bylo provedeno porovnání různých druhů střešních pláštů z hlediska akumulace teplotních zisků v konstrukci.

Klíčová slova

Šikmá střecha, vysoká měrná tepelná kapacita, porovnání těžké a lehké konstrukce, tepelná stabilita vnitřního prostředí, dynamická metoda

Abstract

Construction of heat exchange structures not only of passive buildings is technically demanding. The solution is offered in heat insulation materials with better thermal technical properties or their higher thickness. This can lead to interior overheating problem. The passive solution is to improve the specific heat capacity of the structures, especially the exposed roof cladding, which leads to an increase of phase shift of temperature oscillation and an increase in the energy stored in the structure. This creates the risk of accumulation of heat gains. The subject of the paper is an approach to this issue. Using an idealized model calculated by the dynamic method, a comparison of different types of sloping roofs in terms of the accumulation of temperature gains in the structure was made.

Key words

Sloping roof, high specific heat capacity, comparison of heavy and light construction, thermal stability of the indoor environment, dynamic method

1 ÚVOD

Příspěvek si dává za úkol rozšířit vědomí o problematice, kterou se autor zabývá v rámci svého akademického působení. Článek samotný slouží jako přiblížení autorovy zahraniční publikační činnosti [1] a jako způsob poučení české odborné veřejnosti o riziku použití materiálů s vysokou měrnou tepelnou kapacitou, jímž se autor zabývá.

Trendem současnosti je nárůst požadavků na úsporu energií při provozu všech objektů. Tento požadavek je ukotven nejen v neustále se zpřísňujících českých technických normách (ČSN), ale také například ve směrnici Evropského parlamentu [2]. U doporučených hodnot součinitele prostupu tepla pro ploché a šikmé střechy u pasivních budov, na které je zaměřena tato publikace, lze pozorovat poloviční vzrůst požadavků oproti požadovaným hodnotám [3]. Řešením je použití systémů zateplení vyznačujících se vynikajícími vlastnostmi, jež jsou také často zabudovány o vyšších tloušťkách. Problémem pasivních budov je však při nepochopení vnitřního provozu přehřívání interiérů. To je umocněno velice kvalitními teplosměnnými konstrukcemi a dále neprůvzdušností obálky ($n_{50} < 0,6/h$). Možností stabilizace je mnoho. Nejjednodušším principem je zvýšení násobnosti výměny vzduchu v místnosti přirozeně, tedy okny. Tato metoda je však často nevhodná a nedostatečná

u pasivních budov, kdy by bylo nutné ponechat okenní otvory otevřené téměř po celou dobu večerních hodin. Tento způsob je tedy nevhodný pro uživatele. Dalším způsobem je instalace VZT, tedy nucené větrání, avšak toto opatření vede ke zvýšení energetické náročnosti budovy. Nejvhodnějším způsobem zlepšení tepelné stability interiéru tohoto typu budov je zlepšení materiálů teplosměnných konstrukcí zejména zvýšením měrné tepelné kapacity materiálů samých a s ním spojeným navýšením ukládané energie. Toto však vede k potenciálnímu riziku přehřívání vnitřních prostor. Tato problematika a riziko je patrné zejména na jedné z nejvíce exponovaných teplosměnných ploch objektu, střešním pláští, který je vystaven solárním ziskům po celou denní dobu.

Tento článek se zabývá potvrzením či vyvrácením hypotézy ohledně možného negativního vlivu hmotných materiálů s vysokou měrnou tepelnou kapacitou zabudovávaných do střešních pláštů. Tento vliv může být potenciálně umocněn nepochopením použitých systémů a špatnou koncepcí vnitřního provozu. Za pomoci idealizovaného výpočetního experimentálního modelu bylo provedeno porovnání hmotných pláštů s běžně používanými konstrukcemi a dále vliv orientace vůči světovým stranám z hlediska akumulace teplotních zisků v konstrukci.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Konstrukce šikmých střech a střech všeobecně jsou vzhledem k téměř stálému vystavení solárním ziskům při řešení této problematiky rozhodujícím faktorem, jak ostatně potvrzuje výzkum A. Gagliana [4]. Je tedy zřejmé, že pokud nezajistíme dostatečné provětrání [5], musíme s energií přijímanou střešním pláštěm vhodně naložit. Toto vede buď k navýšení mocnosti tepelné izolace, použití experimentálních skladeb z materiálů s fázovým posunem PCM [6] anebo vylepšení skladeb stávajících o jiné, vhodnější materiály. Jak již bylo řečeno, nejvhodnější je tedy vylepšení právě vlastností samotné nosné konstrukce střešního pláště, a to zejména měrné tepelné kapacity (1).

$$c = \frac{Q}{m\Delta t} \quad [J/(kgK)] \quad (1)$$

kde c – měrná tepelná kapacita, Q – teplo potřebné k ohřátí tělesa [J], m – hmotnost tělesa [kg], Δt – teplota vypočítaná ze vzorce $\Delta t = t_2 - t_1$ [°C], t_2 – konečná teplota tělesa, t_1 – počáteční teplota tělesa.

Pro zvýšení této kapacity je vhodné zvolit materiál konstrukce tak, aby byla jeho hmotnost co nejvyšší. Díky této volbě je poté možné do konstrukce dodávat více energie a oddálit tedy nárůst teploty v čase pomocí změny fázového posunu teplotního kmitu, což dle fyzikálních zákonů bude mít za následek zvýšení stability teploty ve vnitřním prostředí v zimním i letním období. Hlavní výhodou hmotných pláštů je, kromě zvýšení této kapacity, také eliminace problémů spojených s neprůvzdušností obálky budovy v konstrukci střechy. Jsou tedy zdánlivě ideálním prvkem pro pasivní budovy či pro řešení problémů s přehřátím interiéru.

Nárůst energie potřebné ke zvýšení teploty pláště je však spojen s rizikem vyššího ukládání vlhkosti v materiálu, než je tomu například u dřevěných prvků obvykle použitých na šikmé střechy. Současně, díky nárůstu fázového posunu teplotního kmitu spojeném s hmotným materiálem, vzniká problém akumulace tepelných zisků. Jedná se tedy o potenciálně nežádoucí efekty spojené s možností vzniku poruch, tepelných mostů a možného zhoršení tepelné pohody uživatele. Díky dynamické metodě pro výpočet tepelné stability díky metodice CTF (Conduction Transfer Functions) byl sestaven idealizovaný experimentální numerický model, jenž je následně analyzován. Je provedeno porovnání hmotných pláštů s tradiční konstrukcí a dále porovnání vlivu orientace hmotných pláštů vůči světovým stranám z hlediska akumulace teplotních zisků v konstrukci.

3 METODIKA

Pro simulaci je použito reálného objektu nacházejícího se v blízkosti Brna viz Obr. 1 a 2. Objekt je realizován z pórobetonového materiálu a disponuje šikmou střechou hmotného charakteru. Pro samotný výpočet byla vybrána obytná místnost, nad kterou se nachází předmětná střecha a jež disponuje parametry viz Tab. 1.

Tab. 1 Plochy a materiálová specifika [1].

	Podlaha	Vnit. zdi	Vně. zdi	Vnit. dveře	Střeš. okna	Okna	Skladba střech
Plocha [m ²]	85,73	85,15	82,39	7,63	5,12	15,63	82,3
U [W/(m ² K)]	0,158	0,65	0,156	2,7	1,68	0,78	Viz skladba A/B
Objem předmětné místnosti (1.08+1.03) 400,564 m³, hodnota solárního faktoru oken g=0,54							

V rámci srovnání a vyjádření vlivu hmotných pláštů je provedeno srovnání s tradiční skladbou střešního pláště, které jsou běžně užívány na území České republiky viz Tab. 2. Pro výpočet jsou použity interiérové podmínky vycházející z průměrných hodnot pro vnitřní teplotu, relativní vlhkost, způsob vytápění, intenzity větrání, vnitřních

zdrojů vlhkosti, tlakové přírážky a teplotního gradientu, který je typický pro obývací místnosti rodinných domů. Vnitřní provoz je uvažován dle modelové situace typické pro rodinné domy. Exteriér je volen dle skutečného umístění objektu, tedy Brno. Teplotní oblast je uvažována 2 s nadmořskou výškou = 262 m n.m. Parametry vnějšího prostředí byly získány z monitorovacího systému ASHRAE/TWEC – Brno Tuřany.

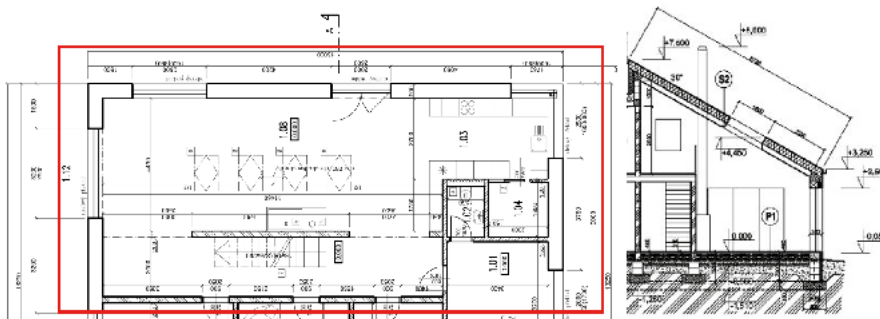
Vzhledem k náročnosti výpočtu byly provedeny idealizace ve smyslu zahrnutí pouze těch konstrukcí, jež bezprostředně souvisejí s potencionální výměnou tepelného toku viz Obr. 3. Do výpočtu jsou tedy zahrnuty pouze místnosti, které sousedí s předmětnou místností.

Tab. 2 Specifikace střešních skladeb [1].

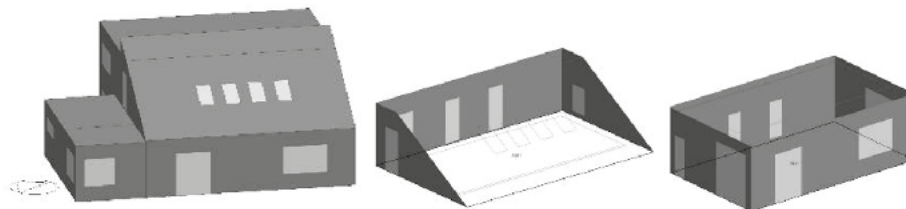
Předmětná skladba	U [W/(m ² .K)]	C [J/(kg.K)]	ρs [kg/m ³]
A – Pórobetonové tvárnice	0,112	585,73	170,84
B – Dřevěný krov + zateplení v úrovni krokvi	0,165	284,27	43,60



Obr. 1 Fotografie předmětného objektu [7].



Obr. 2 Schéma půdorysu 1.NP a řezu objektem A-A' místnosti předmětného rodinného domu [7].



Obr. 3 Idealizovaná výpočetní a hodnotící zóna – vytvořeno v softwaru Design Builder [7].

Stav tepelné stability vnitřního prostředí je simulován a modelován dynamickou metodou pro tepelnou stabilitu. Metoda, na rozdíl od klasického přístupu, zohledňuje všechny vlivy působící na výsledný stav zkoumaného prostoru v průběhu času. Metoda zahrnuje do výpočtu vliv klimatických podmínek, změny materiálových charakteristik, akumulaci tepla apod. Pro sestavení numerického modelu byl použit program Design Builder. Simulace je provedena soustavou vzájemně svázaných diferenciálních rovnic metody CTF (Conduction Transfer Functions [8]) a algoritmem NSGA-II. Metoda CTF je dána rovnicí (2).

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (2)$$

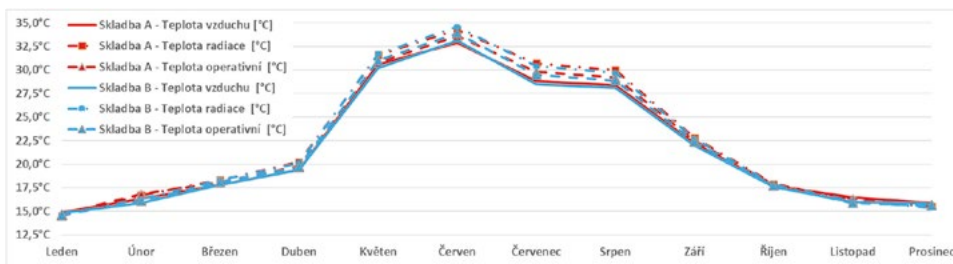
kde g_{ko} – hustota vlhkostního toku [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$], T_o – termodynamická teplota exteriéru [K], T_i – termodynamická teplota interiéru [K], t – daný časový krok, X_j – faktory odezvy, koeficient met. CTF, Y_j – koeficient toku CTF.

Pro zjištění vlivu střešního pláště na stav vnitřního prostředí byl proveden výpočet pro dvě situace a dvě varianty skladeb (A a B). V první situaci je objekt natočen nepříznivě vůči osluněným stranám s odklonem 40° od Severu (reálný stav). V druhé situaci byl objekt natočen ostře vůči osluněným stranám pro maximalizaci solárních zisků s odklonem 220° od severu. V obou případech se uvažuje stejný provoz, stejná intenzita větrání a stejný způsob využití vnitřních prostor.

V rámci profilu využívání vnitřního prostředí je užito pro obě situace stejných, tabulkových, hodnot, které má program k dispozici. Je uvažováno s obsazeností RD pomocí celkem 4 osob, jejichž časový výskyt v předmětném prostředí je rozložen opět dle tabulkových hodnot s ohledem na pracovní dny, víkendy a svátky. Ve vnitřním prostředí se dále uvažuje s režimem vytápění pomocí podlahového vytápění a topnými tělesy, jehož použití vychází z typných sezón typických pro danou oblast. Režim větrání je volen jako kombinace mechanického a přirozeného větrání a infiltrační okny, nikoliv VZT, kdy intenzita výměny vzduchu I_p [h^{-1}] je v hodnotách leden až prosinec **(0.1)** 0,77 [h^{-1} **0.2)** 0,72 [h^{-1} **0.3)** 0,73 [h^{-1} **0.4)** 0,91 [h^{-1} **0.5)** 1,54 [h^{-1} **0.6)** 1,53 [h^{-1} **0.7)** 1,54 [h^{-1} **0.8)** 1,15 [h^{-1} **0.9)** 0,98 [h^{-1} **10.)** 0,72 [h^{-1} **11.)** 0,72 [h^{-1} **12.)** 0,73 [h^{-1}]. Intenzita výměny je rozložena v čase individuálně pro jednotlivé měsíce a pro denní a noční hodiny s důrazem na co nejpřesnější režim odpovídající danému typu objektu. Další zde nezmíněné parametry využívání jsou uvažovány dle tabulkových hodnot příslušných norem. Koncepce clonění, která je z hlediska použití hmotných konstrukcí klíčová, nebyla v rámci objektu z důvodů přiblížení se realitě uvažována. Skutečný objekt není v místech střešních oken, ani v jiném místě cloněn, tedy ani vnější či vnitřní žaluzie. Celkový model je koncipován tak, aby poukázal zejména na rozdíl jednotlivých skladeb.

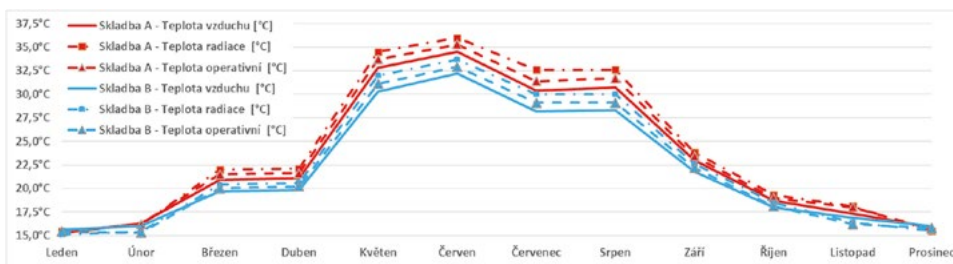
4 VÝSLEDKY

V rámci posouzení je sledována teplota vzduchu (Vzd. [$^\circ\text{C}$]), radiace (Rad. [$^\circ\text{C}$]) a operativní teplota (Ope. [$^\circ\text{C}$]). Simulace s natočením 40° od severu viz Obr. 4 reprezentuje skutečný stav objektu.



Obr. 4 Natočení objektu 40° od severu.

Simulace s natočením 220° od severu viz Obr. 5 reprezentuje nejhorší scénář z hlediska solárních zisků.



Obr. 5 Natočení objektu 220° od severu.

5 DISKUZE

Z výše uvedeného je tedy patrné, že je hypotéza ohledně negativního vlivu hmotných pláštů z materiálů s vysokou měrnou tepelnou kapacitou zabudovávaných do střešních pláštů potvrzena. Míra této negativity je umocněna s ohledem na natočení objektu vůči světovým stranám a s mírou solárních zisků, jak plyne z následující diskuze zaměřené na analýzu výsledků.

Vzájemným porovnáním mezi jednotlivými skladbami střech při nízkých a vysokých solárních ziscích viz Tab. 3 je možné najít patrné rozdíly mezi skladbami při stejných typech solárních zisků. Zatímco u nízkých solárních zisků jsou rozdíly mezi skladbami téměř stejné s nepatrnými a velmi nízkými odchylkami, u vysokých solárních zisků se plně začíná projevovat odlišný parametr měrné tepelné kapacity prezentován nárůstem hodnot.

Naopak, porovnáním stejného typu střešního pláště při rozdílných solárních ziscích viz Tab. 4, je možné porovnat vliv intenzity slunečního záření a z toho plynoucích zisků na samotnou skladbu. Tradiční dřevěná skladba B se vyrovnává s nárůstem solárních zisků relativně dobře a průměrný nárůst během roku není značný. Hodnoty vyzářování konstrukce do prostoru jsou v rámci mezních hodnot značné, avšak celkově skladba vykazuje menší hodnoty teplot s nižší odchylkou. Hmotný plášť skladby A je však při vystavení stejných okrajových podmínek z hlediska akumulace tepla uvnitř konstrukce zatížen a dochází ke značnému nárůstu teplot v čase způsobených právě vyšší měrnou tepelnou kapacitou. Skladba v rámci mezních hodnot vykazuje daleko větší extrémy, než je to u tradičních dřevěných skladeb. Tento rozdíl se ukazuje i přes značnou idealizaci kalkulačního modelu. S vysokou pravděpodobností lze očekávat, že vzhledem ke stále se zvyšujícím průměrným ročním teplotám jsou reálné hodnoty, které by bylo možno naměřit na skutečné budově vyšší, než jsou idealizované simulované hodnoty plynoucí z výpočtu.

Tab. 3 Vzájemné porovnání mezi skladbami A a B při nízkých a vysokých solárních ziscích [1]

Skladba		Průměr	Průměr. odchylka	Minimum	Maximum
Skladby A-B (Nízké zisky)	Vzd. [°C]	0,121	0,1195	-0,22	0,43
	Rad. [°C]	0,078	0,1244	-0,30	0,30
	Ope. [°C]	0,073	0,1089	-0,25	0,30
Skladby A-B (Vysoké zisky)	Vzd. [°C]	1,340	0,7364	-0,28	2,50
	Rad. [°C]	1,551	0,6811	0,01	2,67
	Ope. [°C]	1,447	0,7095	-0,04	2,56

Tab. 4 Vlastní porovnání skladeb A a B při nízkých a vysokých solárních ziscích [1]

Skladba		Průměr	Průměr. odchylka	Minimum	Maximum
Skladba A (Vysoké - nízké zisky)	Vzd. [°C]	1,474	0,6647	0,02	3,11
	Rad. [°C]	1,780	0,7346	0,03	3,64
	Ope. [°C]	1,654	0,7109	0,02	3,38
Skladba B (Vysoké - nízké zisky)	Vzd. [°C]	0,255	0,4418	-0,88	1,87
	Rad. [°C]	0,307	0,4895	-0,96	2,11
	Ope. [°C]	0,280	0,4673	-0,92	1,99

6 ZÁVĚR

Z předchozí kapitoly je možné konstatovat, že materiály s vyšší měrnou tepelnou kapacitou představují při nepochopení jejich odlišného chování potenciální riziko. Problémy lze očekávat zejména v letních měsících. To v kombinaci se špatnou koncepcí vnitřního provozu, vysokým podílem prosklených ploch, nebo zátěží značnými solárními zisky může vytvářet daleko více nepříznivé vnitřní prostředí. Je tedy klíčové upozornit případného majitele na tuto skutečnost a doplnit celkový koncept stavby o stínící prvky, které budou clonit solární zisky. Celkovým doporučením, které je z těchto předběžných výsledků možné vyvodit, je nutnost u hmotných konstrukcí, nejen střešních pláštů, zabránit vstupu slunečního záření do interiéru a "pustit si" teplo do jinak chladného prostředí. Je tedy zcela klíčové dbát nejen na správnou intenzitu výměny vzduchu z hlediska denní doby a teploty vnějšího prostředí, ale také na koncepci clonění teplosměnných konstrukcí a poté zejména okenních otvorů. Přesné řešení však není obsahem a účelem této práce.

Energie, která je takto ukládána do konstrukce v daleko vyšší míře, je v letních měsících bezesporu problémem. V zimních a přechodných měsících však vlastnosti hmotných pláštů vedou dle Obr. 4 a Obr. 5 mohou být naopak přínosné, jak je ostatně patrné také z Tab. 4. Tato skutečnost tak při správném využití a pochopení problematiky návrhu těchto hmotných konstrukcí naopak může vést k velké úspoře energie.

Faktem však zůstává, že v letních měsících je spojení kvalitních izolantů o vyšších tloušťkách s hmotnou konstrukcí problém a že se jedná zatím o relativně málo probádaný problém, který se objevuje na území České republiky díky neobvyklosti konstrukce relativně málo.

Další výzkum by se tedy měl zaměřit na zjištění skutečných hodnot, kterými hmotné konstrukce v letních měsících skutečně disponují a které mohou vést k negativnímu účinku na stav vnitřního prostředí. Současně s tím je vhodné zjistit skutečného chování hmotných konstrukcí v tzv. přechodových a zimních měsících, které mohou vést k pozitivnímu účinku na stav vnitřního prostředí. Z toho tedy vyplývá nutnost dlouhodobého měřicího experimentu spojeného s důkladnou analýzou. Je však pravděpodobné, že takový experiment je nutné vykonávat na různých objektech a současně podrobit případnou skladbu či budovu důkladnému mnohaletému zkoumání.

Jak je napsáno v úvodu, tato práce a poznatky, které vychází z publikace autora a které již byly do jisté míry publikovány [1], slouží zejména jako způsob upozornění české odborné veřejnosti na tuto problematiku, která je opomíjena a která může mít negativní vliv na budoucí výstavbu. Je pravděpodobné, že se tato problematika v budoucích letech bude stále častěji objevovat a lze očekávat nárůst zájmu o předmětné hmotné konstrukce spojený s rostoucím počtem teplých letních dnů a snahou stabilizovat vnitřní prostředí bez dalších energetických výdajů. Je důležité pochopit odlišnost nových technologií a poučit nejen odbornou, ale zejména širokou veřejnost o jiné koncepci užívání tak, aby budoucí stavby mohly být bez nežádoucích protipatření, prodražení a nárůstu energií za účelem vytvoření ideálního vnitřního prostředí užívány.

Poděkování

Tento příspěvek byl financován v rámci projektu č. FAST-J-20-6275 "Analýza hmotných konstrukcí šikmých střech a jejich vliv na stav vnitřního prostředí".

Použité zdroje

- [1] Pilný, O.; Kalousek, L; DESIGN ASSESSMENT OF PITCHED ROOFS WITH HEAVY STRUCTURE USING THE CTF METHOD. In Proceedings of the enviBUILD 2019. Berlin, p. 128-133. ISBN: 978-83-95669-69-9
- [2] Směrnice Evropského parlamentu a rady 2010/31/EU ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov (přepřevzatá), ve znění změny M1 - Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/844 ze dne 30. května 2018 a změny M2 - Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1999 ze dne 11. prosince 2018
- [3] ČSN 73 0540-2 (730540): Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky. Praha: ČNI, 2011
- [4] Gagliano, A.; Patania, F.; Nocera, F.; Ferlito, A.; Galesi, A.; Thermal performance of ventilated roofs during summer period. Energy and Buildings, Vol.49, 2012, p.611-618. ISSN 0378-778
- [5] Bianco, V.; Diana, A.; Manca, O.; Nardini, S.; Numerical investigation of an inclined rectangular cavity for ventilated roofs applications. Thermal Science and Engineering Progress, Volume 6, 2018, p. 426-435. ISSN 2451-9049
- [6] Li, H.; Li, J.; Xi, Ch.; Chen, W.; Kong, X.; Experimental and numerical study on the thermal performance of ventilated roof composed with multiple phase change material (VR-MPCM). Energy Conversion and Management, Volume 213, 2020. ISSN 0196-8904
- [7] Archiv autora
- [8] Application of Conduction Transfer Functions and Periodic Response Factors in Cooling Load Calculation Procedures [online]. Copyright © ResearchGate 2019. All rights reserved. [cit. 6.01.2019]. Accesible from: <https://www.researchgate.net>
- [9] Pilný, O.; Experimentální sběr dat pro zjištění vlivu hmotných pláštů šikmých střech na vnitřní mikroklima. JUNIORSTAV 2020. SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ PROCEEDINGS, 2020, p. 79-84. ISBN: 978-80-86433-73-8

VLIV POPÍNAVÝCH ROSTLIN NA POVRCHOVOU VLHKOST STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

INFLUENCE OF CLIMBING PLANTS ON THE SURFACE MOISTURE OF BUILDING STRUCTURES

Jana Bartlová*¹

*bartlova.j@centrum.cz

¹ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 60200 Brno

Abstrakt

Ozelenění měst (tzv. Green architecture – Zelená architektura) patří k současným trendům ve vývoji především městské architektury. Vyjma systémových prvků fasád porostlých nebo osázených vegetací, které jsou otázkou současného století, patří k Zelené architektuře i tradiční užití rostlin – přímá výsadba v blízkosti stavebních konstrukcí, s jejich vzájemným postupným spojením pomocí šplhavých a přichytných mechanismů rostlin. Dopady působení takového povrchu na tradiční i moderní povrchy budov nejsou zatím přesně definované. Příspěvek prezentuje výsledky měření vlhkosti u vnějšího povrchu stavební konstrukce za účelem zhodnocení vlivu vegetačního pokryvu na konstrukci.

Klíčová slova

Vegetační fasády, zelené fasády, popínavé rostliny, vlhkost povrchu konstrukce

Abstract

Greening of the cities (Green Architecture) is one of the current trends in the development of urban architecture. Apart from the system elements of facades overgrown or planted with vegetation, which are a question of the current century, the Green Architecture also includes the traditional use of plants - direct planting near building structures, with their gradual connection using climbing and attachment mechanisms of plants. The effects of such a surface on traditional and modern building surfaces have not yet been precisely defined. The paper presents the results of moisture measurement of the outer surface of traditional building structures in order to evaluate the effect of vegetation surface on the structure.

Key words

Vegetation facades, green facades, climbing plants, construction surface moisture

1 ÚVOD

Vegetační povrchy fasád jsou v současnosti velmi diskutovaným trendem v moderní architektuře. Z hlediska působení na člověka mají vegetační povrchy pozitivní vliv v mnoha oblastech. Regulují vlhkost a teplotu v okolí budovy, snižují prašnost i hlukové zatížení, zachovávají či obnovuje biodiverzitu oblasti a efektivně se dají využít i pro stínění [1], [2].

Zelené fasády je možné realizovat buď jako systémový prvek fasády [3], obvykle s vlastní nosnou konstrukcí pro plošné osázení vegetací, nebo jako volně rostlou vegetací, mnohdy i nezáměrně vysazenou. Motivací k záměrné výsadbě je obvykle konstrukce z architektonických nebo konstrukčních důvodů nevhodná pro osázení systémových prvků (např. na historických budovách - Obr. 1), nebo finanční náročnost montáže systémové zelené fasády. Popnutím fasády dochází k těsnějšímu spolupůsobení konstrukce s vegetací, a tak není možné se vyhnout některým problémům, které se systémovým řešením lze jednoduše řešit ve fázi návrhu konstrukce. Z tohoto důvodu je zásadní pojmenovat kritické body návrhu fasád s popínavými rostlinami, stanovit dopady na danou konstrukci a definovat doporučení pro návrh funkční konstrukce.

Popínavá vegetace působí na konstrukci mnoha vlivy – působí jak ochranným, tak do určité míry i narušujícím způsobem. Vytváří bariéru mezi vnějším prostředím a první pevnou souvislou vrstvou obálky budovy. Tím ji chrání před přímým působením deště, zachytává prach, tlumí hluk i výkyvy teplot. Pro porušenou konstrukci plní jak plošně zpevňující, tak lokálně narušující funkci. Pro nové konstrukce však nejsou plošně přichytné rostliny

nijak nebezpečné, jejich odstranění při zachování plně funkční podkladní konstrukce je běžně možné. Negativní vliv odstraněné rostliny je poté pozorován pouze na vizuální stránku fasády, kdy přichytné kořínky nebo terčíky prakticky nelze dokonale odstranit. Vegetace povrch budovy zdrsňuje, mění tak podmínky pro výsledné hodnoty zatížení větrem. U některých typů vegetace je nutno počítat s přitížením i od sněhu nebo námrazy. Negativní vlivy se stupňují v případech, že se jedná o nezáměrně popnutou konstrukci vlivem zanedbané údržby. V takových situacích již může docházet i k destruktivním vlivům na konstrukce.



Obr. 1 Fasáda se záměrně porostlou a udržovanou vegetací *Parthenocissus tricuspidata*. Nádvoří zámku Podstatských-Lichtensteinů, Velké Meziříčí.

Motivací pro dlouhodobou práci autora byla otázka negativních vlivů popínavé vegetace na stavební konstrukce. Jakým způsobem a do jaké míry tato přídatná vrstva na straně exteriéru ovlivní stavebně – fyzikální chování konstrukce? S čím je pro návrh těchto konstrukcí potřeba počítat ve fázi návrhu a jak změnit konstrukci pro zachování její maximální životnosti a funkčnosti. Tento příspěvek je věnován otázce vlhkosti těsně pod vnějším povrchem stavební konstrukce. Cílem bylo provést základní měření na reálné konstrukci pro zorientování se v situaci, definování klíčových parametrů, které výsledky ovlivňují, a zhodnocení, zda je vhodné zabývat se podrobnější analýzou problému s formulací dílčích otázek a dlouhodobým měřením na reálné konstrukci.

Hypotézou v tomto měření byl předpoklad, že povrch konstrukce popnutý vegetací je znevýhodněn oproti povrchu bez vegetace z hlediska plynulého prostupu vodních par do volného ovzduší, a tak vegetace na konstrukci může přispívat zrychlení její degradace. Pro tuto hypotézu bylo zvoleno měření na reálné konstrukci, v průběhu šesti měsíců, pro zaznamenání odlišností vlivem měnícího se ročního období.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Mezi architekty, projektanty i investory vzbuzuje použití popínavých rostlin na fasádě budovy obavy z vytvoření bariéry pro vnější povrch konstrukce, která tak nebude plnit svoji funkci při cestě vlhkosti z konstrukce do exteriéru, a bude tak vytvářeno vhodné prostředí pro vznik kondenzace v konstrukci. Pro toto tvrzení či jeho vyvrácení nejsou dosud známá data, a tak otázku reálného vlivu vegetace nelze prozatím zodpovědět. Dostupné výzkumy se obvykle zabývají pouze vlivem rostlinného povrchu konstrukcí na mikroklima uvnitř budov [4], [5], výzkumy týkající se vlivu vegetačního povrchu na samotnou konstrukci nejsou dohledatelné.

Vegetace v těsné blízkosti budov je fenomén, který se vine dějinami lidstva stejně jako linie architektonická. Vinutí vinné révy a dalších popínavých rostlin po konstrukcích budov, altánů a pergol je popisováno již ve starověkém Egyptě a antickém Řecku. Svůj prostor si tak vegetační fasády získaly jak v historii, tak i v současných trendech výstavby. Laická i odborná veřejnost se uchyluje k tomuto řešení při návrhu nových budov i úprav budov stávajících. Žádané jsou popínavé rostliny užití jako řešení pro zkvalitňování prostředí v průmyslových částech měst. Pro navrhování funkčních moderních fasádních systémů s vegetací ovšem chybí dostatečné informace.

Popisem a kategorizací popínavých rostlin se zabýval již Charles Darwin [6], výzkumy na volně rostlém typu vegetačního povrchu ze stavebního hlediska se však téměř nerealizují. Důvody jsou zřejmé: měření jsou omezena

na jejich proveditelnost v terénu, konstrukce popnuté vegetací nelze jednoduše zkonstruovat jako dílčí výsek konstrukce pro laboratorní měření. V případech předpřipravených panelů, určených k popnutí pro budoucí užití pro laboratorní výzkum, se čas na přípravu vhodného, dostatečně vzrostlého vzorku počítá na roky. Ani výsek stávající popnuté konstrukce nelze efektivně přesunout do laboratoře při zachování stejných vlastností rostlin, které jsou extrémně citlivé na narušení a velmi rychle uvadají, čímž ztrácí podstatnou část ze svých funkcí. Pokud se literatura věnuje měření na dílčí části konstrukce, jedná se o prvky fasády se systémovým řešením výsadby [7]. Z těchto důvodů nebylo možné ani v tomto případě uvažovat laboratorní měření pro stanovení skutečných hodnot součinitele difúze vodní páry vegetací porostlé konstrukce pro výpočet difúzního odporu celého souvrství. Provedené měření tak popisuje pouze okamžitý stav při vnějším povrchu konstrukce.

3 METODIKA

Pro měření byla zvolena obvodová stěna rekreačního objektu, stáří přibližně 60 let, vyzděná z cihel plných pálených na maltu cementovou a opatřena běžnou jádrovou omítkou s finální vrstvou a fasádní barvou. Konstrukce nebyla kryta před povětrnostními vlivy např. přesahem střechy, byla tak vystavena plnému působení povětrnostních vlivů. Prvním kritériem výběru byla celoroční přístupnost pro opakované měření, a části jak porostlé vegetací, tak části bez porostu. Dalším kritériem pro výběr byla orientace ke světovým stranám; pro danou parcelu je znám obvyklý směr větrem hnaného deště, proto byla vybrána konstrukce s orientací kolmo na tento směr, pro maximální dešťovou zátěž.

Při výběru měřících bodů byl kladen důraz na výběr materiálově totožných míst měření – sledována byla povrchová vrstva konstrukce, materiál a tloušťka konstrukce, stínění srážek přesahem ostatních konstrukcí; i totožné výškové umístění měřících bodů. Jediným rozdílem tak byla přítomnost či absence vegetace.



Obr. 2 Měřená konstrukce v části porostlé vegetací v jarním a podzimním období.

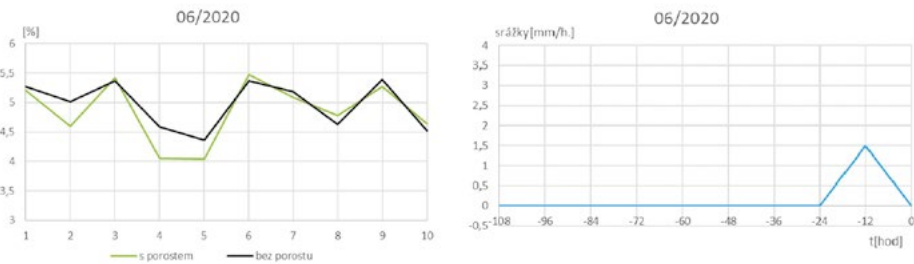
Měření probíhalo v odpoledních hodinách pomocí hrotového vlhkoměru s odchylkou 0,05 procentního bodu, v cyklech opakujících se jednou měsíčně v průběhu sledovaného období (06-10/2020), změřeno bylo vždy 10 hodnot vlhkosti na konstrukci kryté vegetací a též 10 hodnot na konstrukci mimo vegetaci. Vzdálenost mezi měřeními body byla 150 mm. Větší počet dat nebylo možné získat z důvodu malé plochy měřené konstrukce.

Po předběžné analýze prvních dvou cyklů měření bylo k datům z měření přidáno i sledování úhrnu srážek za období 4,5 dne před dnem měření. Data byla získávána z veřejně přístupných dat z meteorologické stanice ČHMI Tišnov-Hájek, vzdálené 5 km od místa měření [8].

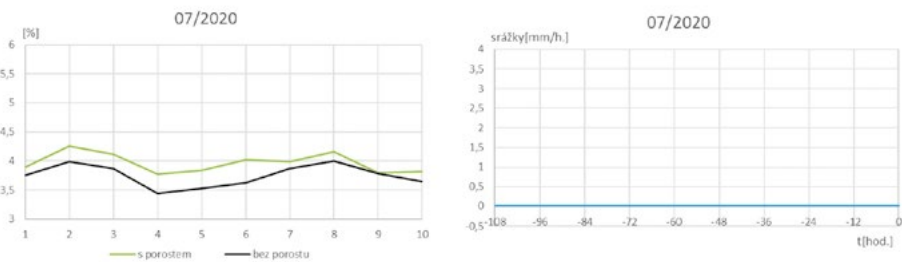
4 VÝSLEDKY

Naměřené hodnoty za první dva cykly nepoukazovaly na vzájemnou souvislost jako jediný celek, zhodnoceny však odděleně pro jednotlivé dny měření byly zřetelně čitelné. Po analýze možných příčin byly k hodnotám vlhkosti přidány i hodnoty úhrnu srážek.

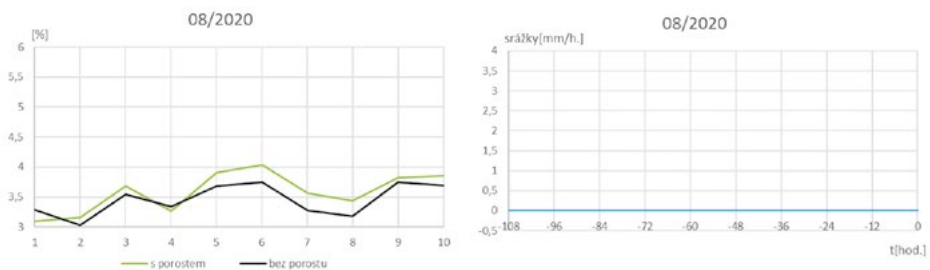
Naměřené hodnoty se v rámci jednotlivých cyklů pohybovaly kolem průměrných hodnot od 3,45 % (v srpnu) do 5,41 % (v říjnu). Z naměřených hodnot je zjevné, že bylo nesprávné uvažovat proměnlivost dat v průběhu roku pouhou změnou ročního období, ale je nutné uvažovat jednotlivé cykly měření jako solitérní soubory dat v kontextu s počasím, resp. se zvážením vlivu srážek, a posuzovat je pak v tomto kontextu i při porovnání cyklů mezi sebou.



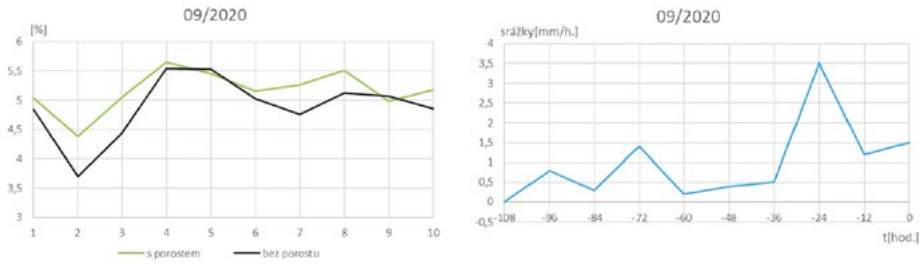
Obr. 3 Graf naměřené vlhkosti konstrukce v 06/2020 a úhrn srážek bezprostředně před dnem měření.



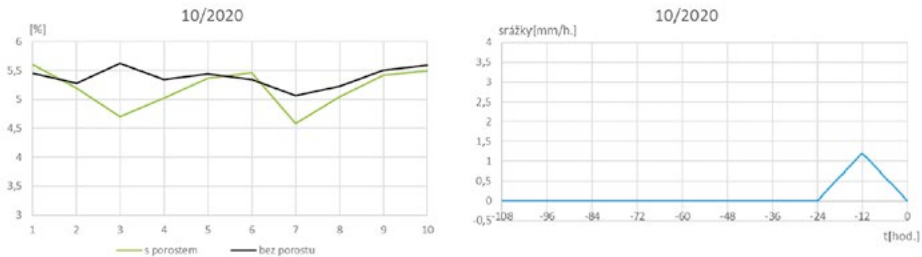
Obr. 4 Graf naměřené vlhkosti konstrukce v 07/2020 a úhrn srážek bezprostředně před dnem měření.



Obr. 5 Graf naměřené vlhkosti konstrukce v 08/2020 a úhrn srážek bezprostředně před dnem měření.



Obr. 6 Graf naměřené vlhkosti konstrukce v 09/2020 a úhm srážek bezprostředně před dnem měření.



Obr. 7 Graf naměřené vlhkosti konstrukce v 10/2020 a úhm srážek bezprostředně před dnem měření.

5 DISKUZE

Naměřené hodnoty vykazovaly společné rysy pro tři odlišné situace-pro období bez dešťových srážek (Obr. 4, Obr. 5), pro období těsně po ojedinělé dešti (Obr. 3, Obr. 7) a období s několikadenním deštěm (Obr. 6). Vliv ročního období lze pozorovat pouze v průměrných hodnotách procentních bodů, kdy v horkém letním období se, zcela očekávaně, vlhkost konstrukce snižuje v obou případech, a to přibližně o třetinu.

Období bez dešťových srážek

Pro toto období jsou naměřené hodnoty velmi blízké, vykazují průměrnou vzájemnou odchylku 0,17 %, kdy konstrukce bez vegetace vykazovala nižší vlhkost. Tyto hodnoty vykazují sice numerické výsledky ve prospěch nezamítnutí zvažované hypotézy, při zvážení přípustné chyby měření přístroje (0,05 procentního bodu) jsou odchylky tak malé, že z nich není vhodné činit žádné závěry bez dalšího přesnějšího měření.

Období po ojedinělém dešti

Pro toto období se projevila ochranná funkce vegetace, která zabránila přímému dopadu deště na konstrukci a tím zřejmě dočasně zůstala konstrukce pod vegetací s nižší vlhkostí než povrch přímo smáčený. Naměřené hodnoty však vykazují ještě menší odchylku než u předchozího případu, a to 0,155 % ve prospěch konstrukce s vegetací.

Období po vytrvalém dešti

Pro období s intenzivním vlhkočním zatížením na straně exteriéru hodnoty vykazovaly stejnou tendenci jako v období bez dešťových srážek, a to vyšší vlhkost na konstrukci s vegetací. Průměrná odchylka mezi hodnotami byla však mírně vyšší než u předchozích případů, a to 0,27 % ve prospěch nezamítnutí úvodní hypotézy.

Naměřené hodnoty jsou natolik homogenní, že nelze zhodnotit výsledek posouzení hypotézy. Pro její nezamítnutí je nutno přesnějších dlouhodobějších měření. Vzhledem k časové náročnosti ručního měření a riziku vysoké chybovosti z nepřesnosti měření lidským faktorem, by bylo vhodné zvážit jiný typ měřicího zařízení, umožňující kontinuální měření v delším časovém úseku.

Velmi překvapujícím jevem, který provázal jednotlivá měření, bylo zjištění subjektivně nižší pevnosti materiálu konstrukce, která nebyla popnuta vegetací. Trny vlhkoměru se do konstrukce bez vegetace zanořovaly s citelně nižším odporem. Z tohoto jevu pak vyvstává otázka, zda i při možné mírně vyšší vlhkosti konstrukce, není zásadnějším faktorem pro její degradaci vystavení konstrukce přímým povětrnostním vlivům bez ochranné bariéry.

6 ZÁVĚR

Cílem měření bylo popsat hrubé rysy vlhkostního chování konstrukce popnuté vegetací v kontextu s konstrukcí nepopnutou. Měření reálné konstrukce přineslo několik podstatných faktorů, ovlivňujících chování konstrukce, jejichž vliv nebyl před měřením zřejmý nebo nebylo zřejmé, že jejich vliv je natolik výrazný. Pro potvrzení či zamítnutí hypotézy bude potřeba podrobnější měření, které by bylo vhodné provádět kontinuálně v průběhu minimálně jednoho roku.

V průběhu měření byl neplánovaně zjištěn pravděpodobný vliv vegetace na snížení rychlosti degradace u této konkrétní konstrukce. V dalším výzkumu se autor příspěvku zaměří podrobněji i na tuto velmi zajímavou otázku.

Použité zdroje

- [1] MANSO, Maria a João CASTRO-GOMES. Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, Vol.41(January 2015), 863-871. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>.
- [2] SAFIKHANI, Tabassom, Amina TUZUHARIAH, Megat Abdullah DILSHAN, Remaz OSSEN a Mohammad BAHARVAND. A review of energy characteristic of vertical greenery systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, Vol.40(December 2014), 450-462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.166>.
- [3] SERRA, V., L. BIANCO, E. CANDELARI, R. GIORDANO, E. MONTACCHINI, S. TEDESCO, F. LARCHER a A. SCHIAVI. A novel vertical greenery module system for building envelopes: The results and outcomes of a multidisciplinary research project. *Energy and Buildings*. 2017, 146(1 July 2017), 333-352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.046>.
- [4] TUDIWER, David a Azra KORJENIC. The effect of an indoor living wall system on humidity, mould spores and CO₂-concentration. *Energy and Buildings*. 2017, 146(1 July 2017), 73-86. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.048](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.048)
- [5] TORPY, FR, M ZAVATTARO a PJ IRGA. Green wall technology for the phytoremediation of indoor air: a system for the reduction of high CO₂ concentrations. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2017, 10(5), 575–585. Dostupné z: [doi:10.1007/s11869-016-0452-x](https://doi.org/10.1007/s11869-016-0452-x)
- [6] Darwin, Ch. (1865): On the movements and habits of climbing plants. *Bot. J. Linnean Soc.* 9, 1–118.
- [7] JIM, C.Y. a He HONGMING. Estimating heat flux transmission of vertical greenery ecosystem. *Ecological Engineering*. August 2011, 37(8), 1112-1122. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.005](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.005)
- [8] http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_srzstationdyn.php?day_offset=0&tday_offset=0&seq=20816221
- [9] PEJCHAL, Miloš: Použití pnoucích rostlin v zahradní a krajinářské tvorbě. Studijní materiál pro předmět "Použití rostlin". ZF MENDELU, Ústav biotechniky zeleně v Lednici, 2017.
- [10] BURIAN, Samuel. Popínavé rostliny. Praha: BRIO, 1997. Zahrada plus. ISBN 80-902-2094-0.
- [11] JESUS, Marina Paschoalinode, Júlia LOURENÇO, Rosa ARCE a Manuel MACIAS. Green façades and in situ measurements of outdoor building thermal behaviour. *Building and Environment*. 2017, 119(July 2017), 11-19. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.041](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.041)

NÁVRH FASÁDNÍHO PANELU ZA POMOCI PARAMETRICKÉHO MODELOVÁNÍ A ADITIVNÍ VÝROBY

DESIGN OF A FACADE PANEL USING PARAMETRIC MODELING AND ADDITIVE PRODUCTION

Jan Vystrčil^{*,1}, Tatiana Rebrova¹

*jan.vystrc@gmail.com

¹Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Článek popisuje problematiku vývoje prototypu vegetačního fasádního panelu za pomoci parametrického modelování. Parametrické modelování pak bylo nejvíce využito pro návrh jednotlivých dílů panelu, a to především pohledové části panelu, kterou tvoří matematicky generovaná síť a dále pro vytvoření nosné struktury pro vegetaci. Výroba jednotlivých prototypů panelů, jejich dílců a součástí byla provedena za pomoci FDM 3D tisku. Jednotlivé prototypy byly dále podrobeny testování v reálných podmínkách pro ověření funkčnosti navrženého prototypu a dále zjištění silných a slabých stránek panelu, které budou využity pro další vývoj.

Klíčová slova

Parametrické modelování, FDM 3D tisk, vegetační stěna

Abstract

The article describes the development of a prototype vegetation facade panel using parametric modelling. Parametric modelling was then most used for the design of individual parts of the panel, especially the visual part of the panel, which consists of a mathematically generated mesh, and also to create a supporting structure for vegetation. The production of individual prototypes of panels, their parts and components was performed with the help of FDM 3D printing. Individual prototypes were further subjected to testing in real conditions to verify the functionality of the proposed prototype and to identify the strengths and weaknesses of the panel, which will be used for further development.

Key words

Parametric modelling, FDM 3D printing, green wall

1 ÚVOD

V návaznosti na postupující změnu klimatu jsou v posledních letech stále častějším tématy trvalá udržitelnost, cirkulární ekonomika, snižování emisí CO_2 , redukce tvorby tepelných ostrovů ve městech, hospodaření s vodou atd. S ohledem na tuto problematiku je stále častěji kladen důraz na zdokonalení návrhu a implementace zelené a modré infrastruktury v urbanistických řešeních.

Zelená a modrá infrastruktura zahrnuje řadu nástrojů za účelem řešení urbanistických a klimatických výzev. Tyto opatření mají podobu přírodního nebo přírodně-technického krajinnotvorného prvku, které v ideálním případě tvoří jeden spolupůsobící prvek. K těmto opatřením patří zejména parkové výsadby, uliční zeleň, zelené střechy a fasády, biotopy, biokoridory, aleje, suché poldry, akumulární nádrže a řada podobných technických opatření, založených na technické bázi. Cílem těchto prvků je zkvalitnit život uživatelů/obyvatel díky omezení vzniku tepelných ostrovů, zvýšení kvality ovzduší a biodiverzity prostředí, využívání obnovitelných zdrojů energie, hospodaření s dešťovou vodou a další adaptační klimatická opatření. Každé opatření má svůj vlastní koncept měřitelných parametrů, kterými lze prokázat míru dopadu na lokalitu. Zmíněnými parametry těchto opatření jsou např. množství zadržené vody, snížení teploty budov a jejich okolí v tropických letních dnech, množství evapotranspirace rostlin apod. Významným aspektem návrhu zmíněných konstrukcí a krajinných prvků je nízká uhlíková stopa a vyčíslitelná ekonomická návratnost.

Zelená fasáda má pro inženýrskou praxi několik zvláštních specifik, které vycházejí z její vlastní definice. Ta zahrnuje kombinaci vegetace jako hlavního aktivního funkčního prvku a podpůrné technické infrastruktury a konstrukce stavby. Často je stavebním technikům a inženýrům vytýkána neznalost potřeb vegetace a jejich podmínek návrhu. Tento fakt je způsoben zejména tím, že řada starších návrhů byla prováděna jako subdodávka bez návaznosti na projektovou přípravu celé stavby, jednotlivé konstrukční detaily a bez požadavků na potreby technické infrastruktury (např. předepsání potřeby připojení na zdroj vody pro závlivku, vhodnost použití vzhledem k orientaci fasády k jednotlivým světovým stranám atd.)

Cílem vývoje je sestavit systémový prvek zelené fasády, který bude v souladu s aktuálními předpisy a legislativou. Odladit design fasádního systému tak, aby měl jasně specifikovatelné stavebně-fyzikální veličiny a návaznost na navazující konstrukce staveb. Dalším cílem je stanovení okrajových podmínek návrhu a použití tohoto systému tak, aby bylo možné co nejvíce eliminovat nefunkční a problematické realizace ještě před tím, než nastanou, tedy v projektové přípravě.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Stávající stav problematiky vegetačních fasád

Tak, jak popisují V. Enzi a spol v *Nature-Based Solutions and Buildings: The Power of Surfaces to Help Cities Adapt to Climate Change and to Deliver Biodiversity* [1], byl předpokládáný podíl obyvatel Evropské Unie ve městech 75 % z celkového počtu. S narůstající se zastavěností měst často ubývá přirozených zelených ploch. Současně s tím dochází, vlivem klimatické změny, ke stále větším výkyvům teplot, přívalovým srážkám a nepředvídatelnému průběhu počasí. Tak, jak jsou tyto změny viditelné ve všech částech světa, postupně dochází nejen k odbornému, ale i politickému tlaku k přijímání opatření redukcí těchto změn. Jako častý příklad opatření redukcí dopad budov na své okolí je ve stavebnictví využívání zelených střech a fasád.

Jednotlivé dělení vegetačních fasád dle konstrukce, jejich náročnost, výhody, nevýhody a druhy rostlin pro jednotlivé vhodné použití vegetačních fasád v Evropě jsou kvalitně shrnuty v diplomové práci *Green façades and building structures*, kterou zpracoval M. A. Mir BSc. [2]. V české republice se můžeme nejčastěji setkat se dvěma druhy zelených stěn. V prvním případě je využíváno popínavých druhů vegetace, které rostou buď přímo na budově nebo na předem vyhotovené předsazené konstrukci. Tato vegetace je pak umístěna přímo v rostlém terénu nebo ve vyvýšených pěstebních kontejnerech. Jedná se o pasivní systém vegetační stěny, neboť vegetace není zakořeněna ve fasádním prvku, ale fasádu pokrývá svým větvením. Vegetace tedy není natolik účinná při ochraně budovy před klimatickými vlivy a redukcí výkyvu teplot budovy a jejího blízkého okolí. Druhým případem, se kterým je možné se setkat je využití fasádních systémů s intenzivní vegetací. Tyto systémy pak častěji nazýváme vertikálními zahradami. U systémů vertikálních zahrad jsou jednotlivé rostliny umístěny v předem dotčených korytkách nebo panelech obsahujících vhodné podmínky pro růst. Vertikální zahrady vyžadují velkou dotaci vodní závlivky, častou údržbu a kontrolu vzrostlé vegetace. S tímto je úzce spojená i vysoká cena. Doposud bylo pro jejich zřízení posuzováno především estetické hledisko před technickými vlastnostmi. Často vyzdvihovány pozitivní vlivy konstrukcí zelených stěn, a to především ochlazení budovy a jejího okolí vlivem odpařování vody jak z rostlin, tak z povrchu vodní hladiny a vegetačních vrstev. Při interpretaci těchto pozitivních dopadů jsou však opomíjeny právě vysoké nároky na potřebu vody, které značně znevýhodňují častější návrhy a použití vertikálních zahrad. Dále jsou jednotlivé technické vlastnosti a dopady těchto systémů jak na přiléhající budovu, tak i na její blízké okolí popisovány ve velmi obecné rovině. V návaznosti na tyto aspekty se s ohledem na současné nároky hospodaření s pitnou vodou a finanční náročností systémů nedá hovořit o trvale udržitelném řešení.

Parametrické modelování a aditivní výroba

S postupným vývojem metod matematického 3D modelování je zjevná tendence k parametrizaci a algoritmicizaci návrhového procesu. Tuto tendenci je možné pozorovat ve všech odvětvích designu, od strojního inženýrství přes architekturu až po navrhování běžně užívaných předmětů, obuvi atd. Vývoj počítačem podporovaného modelování popisuje v disertační práci, *Nové digitální metody architektonického navrhování*, Ing. arch. Adam Sirotek [3].

Jako nosný prvek vegetačního souvrství panelu bylo využito struktur trojitě periodických minimálních povrchů. Základní z množiny těchto struktur je gyroid. Tuto strukturu popsal v roce 1970 Alan H. Schoen[4]. Následně bylo definováno celkem 17 případů trojitě periodických minimálních povrchů bez průniků, jejichž vlastností je, že mají nulové zakřivení. Základní buňka struktury gyroidu je dána zakřivenou plochou, formující se do vzpěr kruhového průřezu, které opisují téměř sférické prázdné jádro. Poloha a tvar jedné buňky struktury gyroidu je popsán implicitní funkcí:

$$\sin\left(\frac{2\pi}{L}x\right) \times \cos\left(\frac{2\pi}{L}y\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{L}y\right) \times \cos\left(\frac{2\pi}{L}z\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{L}z\right) \times \cos\left(\frac{2\pi}{L}x\right) - t = 0 \quad (1)$$

kde L definuje velikost krychle ohraničující prostor jedné buňky gyroidu, t je parametr, který ovlivňuje velikost průměru šikmých vzpěr a tím ovlivňuje nejdůležitější charakteristiku gyroidu – objemový podíl pevné fáze struktury.

Prostorové struktury ze skupiny trojitě periodických minimálních povrchů je díky parametrickému modelování možné snadno vytvořit a editovat. Následně je možné jejich vytvoření za pomoci 3D tisku. Během výzkumu bylo využito metody FDM 3D tisku (Fused deposition modeling), při které dochází k roztavení termoplastického materiálu na příslušnou teplotu tání a dále k nanesení do příslušné polohy. V návaznosti na vývoj 3D tisku současně dochází k rychlému vývoji materiálů použitelných pro tento typ výroby. Nemalou část ze škály těchto materiálů tvoří recykáty. Nedílným prvkem je v tomto souboru materiálů recyklovaný PET. Výroba i recyklace velkého množství tiskových materiálů pro FDM výrobu probíhá na území České republiky. Výroba z těchto materiálů tedy nemá nežádoucí environmentální dopad (jsou recyklované a dále recyklovatelné).

3 METODIKA

V souvislosti se stávajícími znalostmi a dostupností jednotlivých systémů vegetačních fasád začal vývoj systémového sendvičového panelu zelené fasády. Tento panel je uvažován jako extenzivní, podobně jako u navrhování zelených střech tedy uvažuje se suchomilnou vegetací a tím pádem i minimálním množstvím dodané závlivy. Zatím co údržbu vertikálních zahrad je nutné provádět v periodě jednotek týdnů, kontrola a údržba zelených stěn s extenzivní zelení se uvažuje v řádu vyšších jednotek měsíců. Jednotlivé druhy pak musí být voleny individuálně na základě geografickému umístění a orientace zelené stěny ke světovým stranám. Rámcově se jedná o suchomilné a skalní druhy rostlin např. vybrané druhy rozchodníků, sleziníků či netřesků.

Během vývoje fasádních prvků bylo využito modelování s využitím NURBS (Non-uniform rational B-spline) objektů. Pro tento návrh bylo využito programu Rhinoceros 6.0 se zásuvným modulem Grasshopper, který poskytuje prostředí pro algoritmicizaci návrhu se snadno měnitelnými parametry modelu. V rámci vývoje lze tedy velmi rychle a pružně reagovat na získané poznatky.

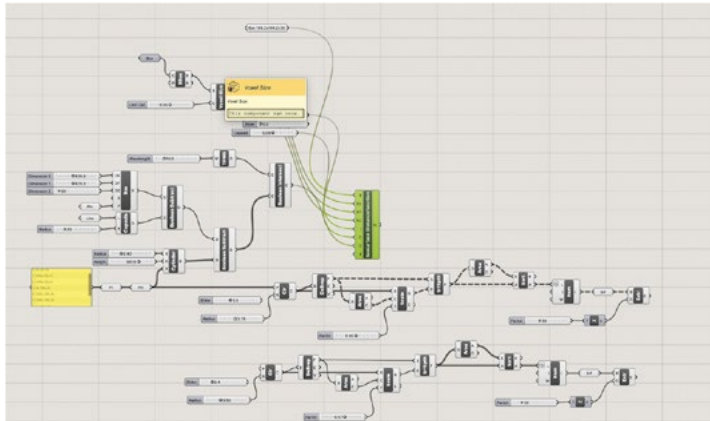
Výsledný prototyp sendvičového panelu se skládá z pohledové krycí vrstvy, dále nosné vrstvy vegetačního souvrství, hydro-akumulační vrstvy z recyklovaného polyesterové textilie a zadní krycí desky. Ve spodní části kazety se nachází nádržka pro sběr dešťové vody.

Jednotlivé prvky prototypu byly vyhotoveny na 3D tiskárně Průša i3 MK3s. Pro výrobu byl zvolen materiál PET, a to pro možnost jeho následné recyklace a faktu, že je tento materiál vyráběn v ČR.

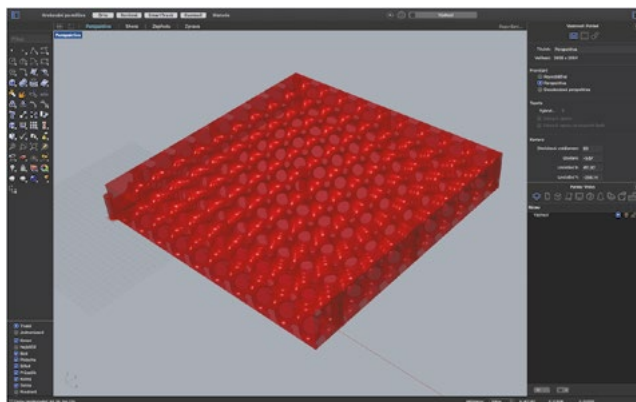
Jednotlivé prototypy byly následně osazeny do venkovního prostředí tak, aby bylo možné kvantifikovat použitelnost panelu vzhledem k jednotlivým světovým stranám, zároveň byla v místě vzorků, umístěna meteorologická stanice, která snímá průběh proudění větru, množství srážek na půdorysnou plochu, množství srážek hnaného deště na jednotlivé světové strany a teplota a vlhkost vzduchu v exteriéru. Je tedy možné pozorovat růst vegetace na jednotlivých světových stranách v závislosti na úhrnu srážek. Na základě těchto dat je možné vyhodnotit možnosti použitelnosti a kritéria bezúdržbového fungování systému v reálných podmínkách.

4 VÝSLEDKY

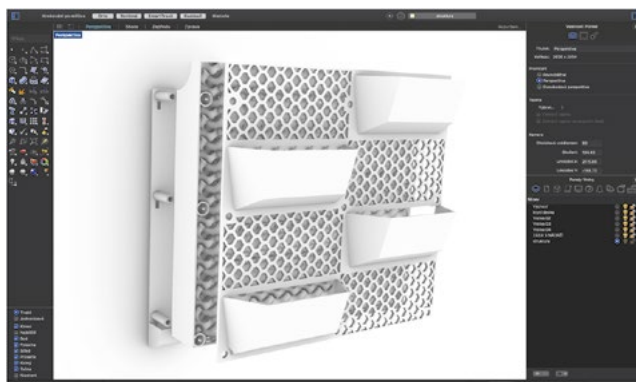
Prototypy vegetačních panelů byly vyrobeny v rozměrech 200×200 mm. Tento rozměr byl zvolen z důvodu omezené tiskové plochy 3D tiskárny a z důvodu možnosti osazení panelu do gabionových košů, ve kterých by panel také mohl být uplatněn. Jednotlivé kroky vývoje prototypu vegetačního panelu jsou znázorněny na Obr. 1 - 5.



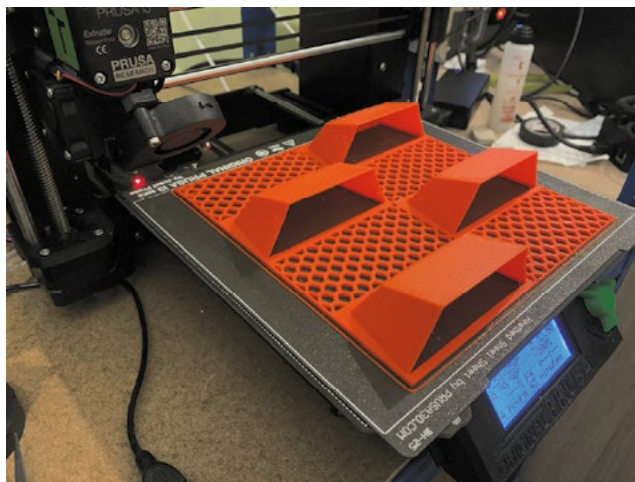
Obr. 1 Algoritmus modelu nosné části vegetačního panelu, tvořené strukturou gyroidu.



Obr. 2 Model nosné části panelu, tvořené strukturou gyroidu.



Obr. 3 3D model jednotlivých součástí sendvičového vegetačního panelu.



Obr. 4 Výroba krycí desky vegetačního panelu metodou FDM 3D tisku.



Obr. 5 Osázený fasádní panel při testování ve vegetačním období.

Rozchodníky vykazovaly během prvního roku testování dobré růstové výsledky na většině z vyrobených panelů. Převládající hnaný déšť byl v místě testování vyhodnocen ze severozápadu, v návaznosti na tuto skutečnost vykazovaly panely orientované na západ větší přírůstky vegetace oproti ostatním.

5 DISKUZE

Dosavadní testování zhotovených prototypů sendvičových panelů zelených stěn vykazovalo kladné chování vegetace. Na konci kalendářního roku bude možné provést shrnutí z hlediska naměřených dat meteorologickou stanicí. V návaznosti na tyto data budou porovnány fotografie z průběhu testování. Dále bude stanovité množství srážek pro růst vegetace v panelu. Metoda 3D tisku dává nové rozšířené možnosti výroby, a to především tvarové. Další otázkou pro vývoj je porovnání cenové výhodnosti výroby 3D tištěného výrobku oproti výrobě vstřikováním do formy. Každá z těchto metod výroby má své výhody a nevýhody, rozhodujícím parametrem však pravděpodobně bude časová náročnost a rentabilita výroby. Výsledný produkt tedy může vykazovat výrazné odlišnosti v návaznosti na možnosti výroby vstřikováním do formy.

6 ZÁVĚR

Výsledkem dosavadní práce jsou jednotlivé prototypy vývoje fasádního panelu systémových zelených stěn. Pro tyto návrhy je velmi vhodné využití parametrického modelování, které umožňuje relativně snadné a časově nenáročné změny modelu. Využití výroby za pomoci 3D tisku se při vývoji ukázalo jako klíčové. Díky velmi rozsáhlým možnostem přesnosti, materiálů, houževnatosti výroby, a především nízké výrobní ceně jednotlivých prototypů.

Poděkování

Príspevek mohl vzniknout díky podpoře projektu FAST-J-20-6476, "Studium parametricky definovaných prostorových struktur fasádních prvků vyráběných z recyklovaných materiálů za pomoci aditivní výroby" a projektu FAST-S-20-6523 "Analýza vzduchotěsnosti stavebních konstrukcí realizovaných pomocí technologie 3D tisku",

Použité zdroje

- [1] ENZI, V., B. CAMERON, P. DEZSÉNYI, D. GEDGE, G. MANN a U. PITHA. Nature-Based Solutions and Buildings: The Power of Surfaces to Help Cities Adapt to Climate Change and to Deliver Biodiversity. Kabisch N., Korn H., Stadler J., Bonn A. (eds), 2017. ISBN 978-3-319-53750-4.
- [2] M. A. Mír BSc. Green façades and building structures. Stevinweg 1 2628 CN Delft. Master thesis. Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, section Materials and Environments, chair Materials & Sustainability.
- [3] SIROTEK, ing. arch. Adam. NOVÉ DIGITÁLNÍ METODY V PROCESU ARCHITEKTONICKÉHO NAVRHOVÁNÍ [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-02-13]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=59414.
- [4] SCHOEN, Alan. INFINITE PERIODIC MINIMAL SURFACES WITHOUT SELF-INTERSECTIONS [online]. Electronic research center, Cambridge Mass. 02139: NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, Washington D.C., 1970 [cit. 2020-02-13]

ANALÝZA ZAŘÍZENÍ STAVENIŠTĚ V HUSTĚ ZASTAVĚNÉM ÚZEMÍ

ANALYSIS OF THE CONSTRUCTION SITE EQUIPMENT IN DENSELY BUILT AREAS

Dita Hořínková^{*,1}

*175865@vutbr.cz,

¹Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Institute of Technology, Mechanization and Construction Management, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Czech Republic

Abstrakt

Tento příspěvek se zabývá analýzou faktoru nedostatku výrobního prostoru na staveništi negativně ovlivňujícího výstavbu pozemních objektů v hustě zastavěném území. Je zde uvažována možnost optimalizace zařízení staveniště ve ztížených podmínkách výstavby buď minimalizací půdorysné plochy objektů zařízení staveniště, anebo umístěním těchto objektů na plochy veřejného prostranství. Cílem analýzy je určit a zhodnotit negativní vlivy, které vznikají následkem faktoru nedostatku výrobního prostoru na staveništi.

Klíčová slova

Zařízení staveniště, minimalizace plochy staveniště, optimalizace staveniště, hustá zástavba budov, časové plánování výstavby

Abstract

This article deals with the analysis of the factor of lack of production space on the construction site, which negatively affects the construction of buildings in densely built areas. The possibility of optimizing the construction site equipment in difficult conditions of construction is considered here, either by minimizing the floor area of the construction site equipment or by placing construction site equipment in public spaces. The analysis aims to identify and evaluate the negative effects that appear because of the factor of lack of production space on the construction site.

Key words

Construction site equipment, minimization of a construction site area, optimization of construction site, densely built areas, construction scheduling

1 ÚVOD

Na území ČR i přes probíhající proces suburbanizace stále dochází ke zhušťování výstavby v centrech měst. Jedná se především o výstavby administrativních a obchodních budov, polyfunkčních domů apod. Ve velkoměstech, především v jejich centrech, tedy vzniká velmi hustá zástavba pozemních objektů, která často vytváří velmi těžké a komplikované podmínky pro proces výstavby dalších objektů. V tomto případě je poukazováno především na budování a provoz redukovaného zařízení staveniště na staveništi s nedostatečným výrobním prostorem. Tyto ztížené podmínky výstavby jsou dále způsobeny např. i legislativními omezeními vztahujícími se k ekologii a bezpečnosti provádění staveb, kolizí s veřejnou dopravou a dalšími vlivy.

Cílem návrhu zařízení staveniště musí být staveniště, které je uspořádané a vybavené takovým způsobem, aby se stavby mohly řádně a bezpečně realizovat, upravovat nebo odstraňovat. Nesmí se přitom ohrožovat a nadměrně nebo zbytečně obtěžovat okolí staveb a porušovat podmínky ochranných pásem nebo chráněných území. Snahou je i minimalizovat celkové plochy potřebné pro zařízení staveniště a využívat plochy, které nejsou ve vlastnictví investora a veřejné pozemní komunikace jen v nutném a nevyhnutelném rozsahu a čase [1]. Tento úkol je velmi obtížné plnit právě v centrech měst s hustou zástavbou. Při pečlivé a kvalitní přípravě průběhu výstavby dojde k zajištění plynulé výstavby celé stavby a tím pádem i ke snížení finančních nákladů na proces výstavby. Aby bylo možné vyvinout racionálnější a efektivnější postup pro realizaci projektu stavby, je třeba věnovat větší pozornost fázi počátečního plánování a přípravy zařízení staveniště [2].

Tento článek obsahuje především analýzu faktoru nedostatečného výrobního prostoru pro zařízení staveniště při výstavbě budov v centru měst a jeho negativní vlivy na proces výstavby, ale i upozornění na některé další vlivy, které tento proces komplikují. Teprve po provedení důkladné analýzy těchto vlivů je možno na tuto práci navázat a navrhnout řešení, jak tyto vlivy zmírnit, popř. zcela vyloučit.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY V ČR A V ZAHRANIČÍ

V této kapitole je uveden stručný přehled článků zabývajících se související tematikou, které sloužily i jako podklad pro zpracování tohoto příspěvku. Je zpracována řada příspěvků, ve kterých se autoři zabývají negativními vlivy z procesu výstavby na okolí stavby a optimálním návrhem zařízení staveniště.

Efektivním využitím nedostatečného výrobního prostoru pro zařízení staveniště se doposud v ČR zabýval V. Motyčka v práci s názvem **Stanovení optimální skladovací plochy na staveništi** (2001). Cílem byl návrh metody pro stanovení optimální velikosti skladovacích ploch stavebního materiálu na staveništi, která by reagovala na zásadní změny ekonomického prostředí a zohledňovala specifické podmínky jednotlivých staveb, které ovlivňují velikost skladovacích ploch. Zohledňují se zde především nároky na plochu konkrétních stavebních materiálů vyžadujících uskladnění na staveništi, časový plán průběhu jednotlivých činností, způsob a organizace dodávek materiálů a charakter jejich spotřeby. Potřebná velikost skladovacích ploch v konkrétním čase výstavby se zde určí pomocí Poissonova rozdělení [3]. Dále se V. Motyčka věnoval posouzení nutné plochy staveniště pro stavbu v návaznosti na časový plán stavby v článku s názvem **Skladovací plochy na staveništi** (2000) [4].

Dalšími faktory ovlivňujícími efektivnost výstavby v souvislosti se zařízením staveniště se zabývají autoři, kteří jsou dále uvedeni.

Příkladem zabývajícím se problematikou hluku z pohledu chráněného stavebního prostoru v blízkosti stavby je práce R. Kantové s názvem **Construction Site Noise and its Influence on Protected Area of the Existing Buildings** (2014). Při optimalizaci procesu stavby v hustě zastavěných oblastech a v centrech měst je nutné plánování výroby zaměřit na oblasti hluku in-situ, jeho vytváření, modelování, a metodiky návrhu k posouzení celkového hluku v lokalitě. Článek analyzuje zavedení problému nových přístupů při optimalizaci pro danou lokalitu a aspekty nezbytnosti hlukové zástavby ve stavebně technologických přípravách stavby. Článek podrobně definuje zdroje hluku během výstavby, zabývá se modelováním zdrojů hluku na stavbě a hodnotou struktur chráněného prostoru. Představuje příklady hlukových studií, kde jsou zachyceny vlivy hluku na nejbližší místa chráněná místa a obytné oblasti. Představuje metodiku práce s hodnotami vstupů a výstupů při práci se softwarovou podporou [5].

M. Zhang ve svém příspěvku s názvem **Research on the Application of Intelligent Construction Site in Construction Site Management** (2020) studuje implementaci inteligentního staveniště prostřednictvím výzkumu řízení kvality staveniště v kombinaci s informačními technologiemi. Provádí zde hloubkovou analýzu problémů se správou staveniště a předkládá využití technologie BIM pro výměnu informací, k předběžnému posouzení bezpečnosti a předvídání nebezpečných faktorů ke zvýšení bezpečnosti na staveništích [6].

3 POUŽITÉ METODY PRO ZPRACOVÁNÍ TÉMATU

Prvním krokem pro získání podkladů potřebných pro zpracování tohoto příspěvku bylo provedení rešeršní činnosti příspěvků zabývajících se související tematikou a dále provedení terénního průzkumu na stavbách probíhajících v centru města Brna. Na fotografiích níže jsou uvedeny příklady staveb, které probíhají ve ztížených podmínkách.



Obr. 1 Výstavba pozemních staveb v centru Brna.

Metodikou této práce je definování a analýza hlavních faktorů vznikajících vlivem nedostatečného výrobního prostoru pro vybudování a provoz zařízení staveniště, které negativně ovlivňují proces výstavby v zastavěném území. Poté definování následků těchto faktorů a rizik, které vznikají vlivem těchto faktorů a návrh opatření, kterými může zhotovitel, resp. připravář, těmto rizikům předejít. Po analýze těchto faktorů bude provedeno shrnutí a jejich porovnání a bude snaha dojít k závěru, jak tyto faktory eliminovat či omezit.

Velikost celkové plochy zařízení staveniště lze orientačně stanovit součtem těchto ploch: investiční objekty stavby, plocha zařízení staveniště pro zhotovitele stavební části, plocha zařízení staveniště pro zhotovitele technologické části, mezideponie výkopku a ornice, ostatní části zařízení staveniště nezbytné pro provoz (jeřábové či pojezdové dráhy, ochranná pásma, lešení apod.) [1]. Snahou zhotovitele, resp. připraváře, je minimalizovat veškeré tyto plochy mimo ploch investičních objektů. Z důvodu nedostatku výrobního prostoru je nutné zřídit redukované zařízení staveniště, které bude zabírat jen takovou plochu, kterou má dodavatel reálně k dispozici. V případě, že pozemek ve vlastnictví investora nedisponuje dostatečnou půdorysnou plochou pro umístění objektů zařízení staveniště, je někdy i nutné zřídit část zařízení staveniště na plochách veřejného prostranství či plochách jiného soukromého vlastníka. V každém případě jsou náklady za pronájem těchto ploch nezanedbatelné [1]. Následující kapitoly se zabývají oběma možnostmi řešení nedostatečného výrobního prostoru pro zařízení staveniště, tj. minimalizací ploch objektů zařízení staveniště i jejich umístěním mimo pozemek, který je ve vlastnictví investora.

4 ANALÝZA NEGATIVNÍCH VLIVŮ PŘI REDUKCI PŮDORYSNÉ PLOCHY ZAŘÍZENÍ STAVENIŠTĚ VE ZTÍŽENÝCH PODMÍNKÁCH VÝSTAVBY

Pro objekty zařízení staveniště je třeba využít pouze plochy, které má zhotovitel reálně k dispozici. Proto je často nutné provést redukci ploch zařízení staveniště vzhledem k nedostatku výrobního prostoru. Návrh zařízení staveniště musí být více promyšlený a propracovaný než v případech, kdy není nutno se s nedostatkem výrobního prostoru potýkat, a je nutné věnovat mu více času a energie. Předmětem této kapitoly je redukce půdorysné plochy pro účely zařízení staveniště vhodným rozložením objektů v prostoru (např. stavěním stavebních kontejnerů na sebe), nebo jejich minimalizací. Omezení potřebné půdorysné plochy pro účely zařízení staveniště je však možné řešit řadou dalších způsobů. Jedná se např. o optimalizaci výrobního prostoru v závislosti na návrhu vhodného konstrukčního systému stavby, prostorových podmínkách realizované stavby, časovém průběhu prováděné stavby, způsobu řízení výstavby, způsobu zásobování a efektivního využití skladovací plochy. Dále v závislosti na vlivu komunikačního systému na rychlost a efektivnost výstavby, nebo i volby a umístění strojů pro vertikální dopravu v závislosti na konstrukčním systému realizovaného objektu a technologickém postupu výstavby.

Optimální využití minimálního možného prostoru pro objekty zařízení staveniště

Jednou z možností je snaha o zřízení co nejmenších skladových ploch. Za tímto účelem je nutné mít na stavbě jen potřebné množství stavebního materiálu, které zajistí plynulou stavební výrobu. Toto se řeší modelem zásobování s cyklickou dodávkou a postupnou spotřebou materiálu [1]. V případě chybného stanovení druhu a množství materiálu potřebného pro konkrétní pracovní proces v určitém čase dojde k narušení plynulosti výstavby a vzniknou časové prostoje. Následkem by bylo prodloužení doby výstavby a zvýšení finančních nákladů. Minimalizace skladovacích ploch se zajištěním plynulé stavební výroby na sebe tedy váže požadavek na velmi přesný časový plán stavby, vypracování bilance zdrojů a operativního plánu, což omezí výše uvedená rizika.

V současné době běžně v praxi dochází i k poddimenzování objektů zařízení staveniště. Tím je myšleno, že se na staveništi např. nebudou nacházet veškeré sociálně-hygienické a provozní objekty. Tj. např. nedostatek kontejnerů s účelem šatny, použití pouze mobilního WC místo hygienického kontejneru, nedostatečná plocha kanceláří atd. Nebudou tedy zajištěny dostatečné pracovní podmínky, což může vést i ke snížení pracovní výkonnosti. Nezajištění nutné minimální výbavy pro zařízení staveniště v žádném případě není správným řešením a nemělo by k tomuto docházet. Avšak v praxi je tento způsob řešení nedostatečného výrobního prostoru na staveništi stále nesprávně používán.

Omezení potřebné plochy staveniště vhodným prostorovým návrhem

V případě navržení potřebných dimenzí zařízení staveniště, ale na menší ploše (např. při stavění stavebních kontejnerů na sebe), mohou na staveništi vzniknout vyšší bezpečnostní rizika. Při návrhu a realizaci zařízení staveniště je tedy nutné věnovat zvýšenou pozornost bezpečnostním rizikům.

Na staveništích s omezenou půdorysnou plochou většinou není možné provádět zajištění výkopů svahováním, protože zřízení svahu vyžaduje další půdorysnou plochu. Výkopy se v tomto případě provádí se svislými bočními stěnami, které je v zastavěném území při hloubce větší než 1,3 m v případě ručního kopání nutné zajistit pažením [7]. Svislé zajištění výkopů může být provedeno buď jako dočasné, nebo trvalé. V případě dočasné konstrukce se může jednat např. o roubení s pažením přílozým, hnaným, záporovým (i pomocí mikropilot) atd. Další možností je zajištění svislých stěn výkopu podzemními stěnami. Jedná se např. o Milánské stěny, pilotové stěny, štětovicové stěny atd. Tyto stěny lze následně použít jako suterénní stěny budovaného objektu.

Řešení zajištění svislých stěn výkopů zvyšuje finanční náklady na realizaci stavby a prodlužuje dobu výstavby. Dále vzniká bezpečnostní riziko zасыпání pracovníků pohybujících se ve výkopu zeminou v případě nesprávného návrhu či provedení tohoto zajištění. Růst finančních nákladů je možno řešit provedením důkladné ekonomické rozvahy, a to nejen ze strany zhotovitele, ale především ze strany projektanta. Z této rozvahy vyplyne, zda je z ekonomického hlediska výhodnější zajistit svislé stěny výkopů dočasnou nebo trvalou konstrukcí. Tím by teoreticky mohlo dojít i ke zkrácení doby výstavby, na rozdíl od provádění dočasné konstrukce. Rizika BOZP lze řešit důsledným dodržováním souvisejících legislativních předpisů, a to především nařízením vlády č. 591/2006 Sb. a dále zvýšenou pozorností jak při návrhu a statických výpočtech, tak při samotné realizaci.

5 ANALÝZA NEGATIVNÍCH VLIVŮ PŘI VYUŽÍVÁNÍ PLOCH VEŘEJNÉHO PROSTRANSTVÍ

Zastavení dopravního prostředku a pracovní pozice stavebního stroje v místech veřejného prostranství

V některých lokalitách není na staveništi dostatečný prostor pro zastavení dopravních prostředků za účelem zásobování stavby. V takovém případě musí během vykládky materiálu dopravní prostředek zastavit na plochách veřejného prostranství či jiného soukromého vlastníka, nebo i na veřejné komunikaci. To se často může stát např. při čerpání čerstvého betonu z čerpadla na automobilovém podvozku, nebo při přemísťování materiálů mobilním jeřábem, který má pracovní pozici na veřejné ploše. V některých případech je nutno dopravní prostředek, nebo stavení stroj, zastavit i v místě provozu MHD, např. v kolejišti tramvaje. Zájem zhotovitele je buď minimalizace doby, kdy dopravní prostředek a další stavební stroje narušují plynulost veřejné dopravy, nebo plánování časů nájездů pro zásobování tak, aby ke kolizi s veřejnou dopravou docházelo minimálně, nebo vůbec. Tím je myšleno např. zásobování o víkendech nebo v době nočního klidu. Pro minimalizaci doby, kdy dopravní prostředek narušuje plynulost veřejné dopravy, musí dojít k okamžitému složení materiálu. Zvedací mechanismus i pracovníci musí být v pohotovosti a neobsluhovat v této době žádný jiný pracovní proces. Vyložení materiálu musí mít nejvyšší prioritu. Dále musí vykládku materiálu provádět velmi dobře koordinovaná pracovní četa. V případě plánování zásobování na nejvhodnější dobu je nutné mít k dispozici přesný časový plán neboli operativní plán stavby. Také je vhodné omezit počet nájездů pro zásobování na minimum, což je v rozporu s faktorem popisovaným v kap. „Optimální využití minimálního možného prostoru pro objekty zařízení staveniště“, kde má minimalizace prostoru pro zařízení staveniště vliv na omezení velikosti skladovacích ploch, tj. i jejich kapacitu. Vypracování přesného časového plánu neboli operativního plánu, a správná koordinace pracovníků při skladování materiálu vyžaduje i vyšší požadavky na kvalifikaci pracovníků.

Další komplikací, která může vzniknout při zastavení dopravního prostředku mimo staveniště, je bezpečnostní riziko. Proto je nutné zajistit správnou koordinaci veřejné dopravy, a to např. vhodným dočasným dopravním značením, vypracováním kvalitního a komplexního projektu „Zásady organizace výstavby“, „Dopravně inženýrská opatření“ atd.

Umístění objektů zařízení staveniště na plochách veřejného prostranství

Další možností optimalizace zařízení staveniště je umístění některých objektů zařízení staveniště na plochách veřejného prostranství nebo jiného soukromého vlastníka nebo i veřejné pozemní komunikaci. Jedním z negativních vlivů, které má toto řešení na své okolí, je opět narušení plynulosti dopravy. Dalším negativním vlivem je zvýšení „provozních nákladů“ na zábory veřejných pozemků. Aktuálně pro rok 2020 se cena pronájmu veřejného prostranství v centru Brna pohybuje okolo 10 Kč/m²/den, což není při uvažování dlouhodobého pronájmu zanedbatelná částka. Problém s narušením plynulosti veřejné dopravy je možné řešit i zajištěním náhradní dopravy, čímž dojde také ke zvýšení finančních nákladů. Snahou je tedy v každém případě minimalizovat dobu, kdy objekty zařízení staveniště zabírají část veřejného prostranství. Toho dosáhneme postupným přizpůsobováním skladby zařízení staveniště v návaznosti na časový plán stavby. K tomu je tedy opět potřeba mít k dispozici přesný a kvalitně zpracovaný časový plán stavby a provádět operativní plánování.

6 VÝSLEDKY

Níže v grafech na Obr. 2 a Obr. 3 jsou shrnuty negativní vlivy a jejich řešení uvedené v předešlých kapitolách.



Obr. 2 Analýza negativních vlivů při redukcí redukcí půdorysné plochy zařízení stavenišť ve ztížených podmínkách výstavby.



Obr. 3 Analýza negativních vlivů při využívání ploch veřejného prostranství.

7 DISKUZE

Z Obr. 3 a Obr. 4 uvedených v kap. „6 Výsledky“ vyplývá, že nejčastějšími negativními vlivy ovlivňujícími proces výstavby v hustě zastavěném území s následkem faktoru nedostatečného výrobního prostoru na staveništi pro zařízení staveniště jsou: zvýšená bezpečnostní rizika, růst finančních nákladů, prodloužení doby výstavby, narušení plynulosti veřejné dopravy a snížení komfortu pracovníků a kvality pracovních podmínek. Aby bylo možné tyto negativní vlivy omezit, či eliminovat, je nutné se důkladně zabývat časovým plánováním stavby, a to i do nejpodrobnějších druhů časového plánování, tj. zpracování operativních plánů. Dále je důležité věnovat pozornost bezpečnostním rizikům vznikajícím výstavbou, a to jak rizikům, která se týkají pracovníků pohybujících se na stavbě, tak i rizikům, kterými je ohrožena veřejnost pohybující se v blízkosti staveniště.

8 ZÁVĚR

Tento příspěvek se zabýval analýzou faktoru nedostatku výrobního prostoru na staveništi negativně ovlivňujícího výstavbu pozemních objektů v hustě zastavěném území. Byla zde uvažována možnost optimalizace zařízení staveniště ve ztížených podmínkách výstavby omezením půdorysné plochy objektů a umístěním objektů zařízení staveniště na část veřejných prostranství. Pro každou možnost optimalizace zařízení staveniště ve ztížených podmínkách výstavby zde byly uvedeny negativní vlivy na proces výstavby a návrh jejich řešení. Jedním z nejčastěji požadovaných prostředků pro navržená řešení byl podrobný časový plán stavby, ze kterého musí vycházet operativní řízení stavby včetně bilance zdrojů a zařízení staveniště. Poznatkem po zpracování příspěvku

je skutečnost, že je vhodné upravovat skladbu a dimenze zařízení stavenišť v závislosti na požadavcích aktuálně realizovaného pracovního procesu a v návaznosti na časový plán stavby. Dále je nutné zabývat se i problematikou BOZP. Tyto uvedené poznatky odpovídají původním předpokladům a potvrzují, jakou tematikou je nutné se v souvislosti s řešeným problémem zabývat. V souvislosti analýzy faktorů negativně ovlivňujících výstavbu v hustě zastavěném území je potřeba se zabývat i dalšími faktory, jako např. omezením legislativními požadavky z hlediska ekologie atd. Toto téma však bude předmětem dalšího výzkumu.

Použité zdroje

- [1] JARSKÝ, Čeněk. *Technologie staveb II.: Příprava a realizace staveb*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-7204-282-3.
- [2] USTINOVICH IUS AFFILIATION, Leonas. A model for spatial planning of site and building using BIM methodology. *Journal of Civil Engineering and Management*. Vilnius Gediminas Technical University, 2017, 23(2), 173–182. ISSN 1392-3730. Dostupné z: doi:10.3846/13923730.2016.1247748
- [3] MOTYČKA, Vít. Stanovení optimální skladovací plochy na staveništi. VUT v Brně, Fakulta Stavební, 2001. Kandidátská disertační práce. VUT v Brně, Fakulta Stavební.
- [4] MOTYČKA, Vít. Skladovací plochy na staveništi. In: *TECHSTA 2000 - Odborná konference s mezinárodní účastí*. ČVUT Praha, Fakulta stavební: ČVUT Praha, Fakulta stavební, 2000. ISBN 80-01-02225-0.
- [5] KANTOVÁ, Radka a Vít MOTYČKA. Construction Site Noise and its Influence on Protected Area of the Existing Buildings. *Advanced Materials Research*. 2014, (1041), 419–423. ISSN 1662-8985. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1041.419
- [6] ZHANG, Meng. Research on the Application of Intelligent Construction Site in Construction Site Management. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 768. IOP Publishing, 2020. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/768/6/062005
- [7] ČESKÁ REPUBLIKA. Nařízení vlády č. 591/2006 Sb., o bližších minimálních požadavcích na bezpečnost a ochranu zdraví při práci na staveništích. In: *AION CS 2010-2020, 2006*. Dostupné také z: www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-591/zneni-20160501

ÚVOD DO UDRŽATEĽNEJ VÝSTAVBY

INTRODUCTION TO SUSTAINABLE CONSTRUCTION

Jana Budajová^{*,1}

*jana.budajova@tuke.sk

¹Ústav pozemného staviteľstva, Stavebná fakulta, Technická univerzita v Košiciach, Vysokoškolská 4, 042 00 Košice, Slovenská republika

Abstrakt

Udržateľná výstavba je hlavnou témou dnešných diskusií. Anglické slovo „sustainability“ v preklade znamená schopnosť pokračovať. Ekologická architektúra sa ako rozhodujúci postoj k základným princípom architektonickej tvorby neustále formuje. Cieľom tohto článku je poskytnúť stručný prehľad o súčasnej udržateľnej výstavbe, stavebných materiáloch a nových technikách pre zlepšenie udržateľnosti budov. Potreba udržateľného zastavaného prostredia je naliehavá vzhľadom na jej pozitívny vplyv na životné prostredie. Veľké zmeny počasia si vyžadujú viac plánovania a prísnejšie technické normy. Je niekoľko pojmov týkajúcich sa tejto témy, ako ekologické a zelené budovy, udržateľná budova a výstavba, životný cyklus budov, energetická hospodárnosť a ďalšie.

Kľúčové slová

Udržateľná výstavba, udržateľné stavebné materiály, udržateľný rozvoj, životný cyklus budov, energetická hospodárnosť

Abstract

Sustainable construction is a major topic of discussion today. The English word "sustainability" means the ability to continue. Ecological architecture is constantly being formed as a decisive attitude towards the basic principles of architectural creation. The aim of this article is to provide a brief overview of current sustainable construction, building materials and new techniques for improving the sustainability of buildings. The need for a sustainable built environment is urgent given its positive impact on the environment. Major weather changes require more planning and stricter technical standards. There are several concepts related to this topic, such as green and green buildings, sustainable building and construction, the life cycle assessment, energy efficiency and more.

Key words

Sustainable construction, sustainable building materials, sustainable development, life cycle assessment energy efficiency

1 ÚVOD

V dnešnej dobe sa vynárajú viaceré otázky, ako zlepšiť postupy výstavby s cieľom minimalizovať ich nepriaznivý vplyv na životné prostredie. Vplyv výstavby a samotnej stavby na životné prostredie, zelené budovy, recyklovateľné materiály, zníženie uhlíkovej stopy upútali pozornosť projektantov na celom svete [1]. Stavebný priemysel má výrazný vplyv na spotrebu prírodných zdrojov, taktiež aj na energetiku na celom svete ako aj spotrebu emisií skleníkových plynov [2].

Nové nástroje, ako napríklad informačné modelovanie budov (BIM), ktoré vytvára trojrozmerné znázornenia modelu spojené so softvérom na energetické modelovanie, denné osvetlenie a hodnotenie životného cyklu (LCA), zvyšujú kvalitu spolupráce a znižujú náklady na zelené budovy. Taktiež sa objavujú doplnky pre BIM, ktoré vytvárajú dokumentáciu pre certifikáciu zelených budov založenú na systémoch posudzovania budov, aby ďalej znižovali výzvy spojené s vytváraním udržateľného prostredia [3].

Zelené budovy a celkovo udržateľná výstavba sa stali hlavným opatrením na zmiernenie negatívnych dopadov stavebného priemyslu na životné prostredie [4].

2 UDRŽATELNÁ VÝSTAVBA

Udržateľnosť sa niekedy označuje ako konečný stav, ako keby sa dala dosiahnuť raz a navždy [3]. Prvá definícia udržateľného rozvoja bola definovaná v Broundlandovej správe z roku 1987 ako „Vývoj, ktorý vyhovuje potrebám súčasnosti bez toho, aby bola ohrozená schopnosť budúcich generácií uspokojovať svoje vlastné potreby“. Zelené budovy môžu byť definované ako zariadenia, ktoré sú výsledkami udržateľného rozvoja – výstavba na účely podpory zdravia užívateľov, efektívne využívanie zdrojov, minimalizácia dopadov na životné prostredie. Jednu z definícií udržateľnej výstavby navrhol Kibert ako „... vytváranie a prevádzka zdravých budov a ich prostredia založené na efektívnom využívaní zdrojov a ekologického dizajnu“. Udržateľná výstavba teda najkomplexnejšie rieši ekologické, sociálne a ekonomické otázky budovy [5]. Stala sa uskutočniteľným riešením na prekonanie rôznych sociálnych, ekonomických a environmentálnych problémov, ktorým čelí stavebný priemysel [6]. Pri hodnotení miery udržateľnosti budov sú posudzované kritériá ekonomické, sociálne a environmentálne v ich vzájomnej previazanosti. Ideálnym výsledkom je stav, kedy sú aspekty zo všetkých troch sfér, vzájomne na seba pôsobiace, zastúpené vo vyváženom pomere.

Pri návrhu modernej udržateľnej budovy je potrebné zväziť, ktoré požiadavky sú skutočne nevyhnutné a ktoré má zmysel v rámci udržateľnosti eliminovať. Umiestnenie a funkcie stavby, jej prispôsobivosť zmenám, životnosť, orientácia, veľkosť, forma a konštrukcia, použité materiály, spôsob vykurovania a vetrania - to všetko dohromady určuje množstvo energie, ktorá je potrebná na výstavbu budovy a na dopravu stavebných materiálov, následne na údržbu a prevádzku budovy, na dopravu užívateľov k budove a od nej. Je potrebné pokračovať až ku konečnej fáze cyklu stavby a to demolácii a jej spôsobe [7].

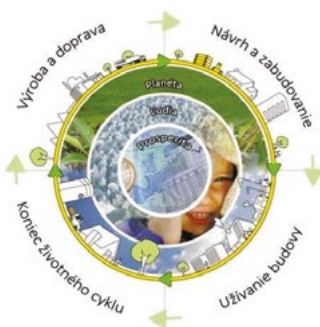
Životný cyklus budov

Vplyv výstavby na životné prostredie je posudzovaný podľa správania budovy, jej vplyvu na životné prostredie, a to počas celej jej existencie a prevádzky. Pre hodnotenie tzv. životného cyklu budov sú potrebné podrobné dáta / údaje o vlastnostiach stavby, stavebných materiáloch, technológiách a ďalších skutočnostiach súvisiacich s existenciou budovy. Do životného cyklu budovy sú zahrnuté všetky etapy, od jej vzniku cez vývoj počas života - prevádzky až po jej zánik. V priebehu životného cyklu spotrebujú stavby značné množstvo zdrojov a prispievajú k premene oblastí. Výsledkom toho môžu byť významné ekonomické následky a vplyvy na životné prostredie a ľudské zdravie. Preto sa snažíme minimalizovať vplyvy stavieb na prostredie počas celého ich životného cyklu [7].

Komplexnou analýzou životného cyklu budovy sa zaoberá metóda LCA - „Life Cycle Assessment“, ktorá posudzuje vplyv stavby počínajúc získavaním materiálov pre výrobu stavebných konštrukcií cez záťaž počas prevádzky a aktívneho života stavby až po likvidáciu odpadu po zániku, demolácii stavby [8].

Podľa tohto hodnotenia môže byť budova v hodnotená:

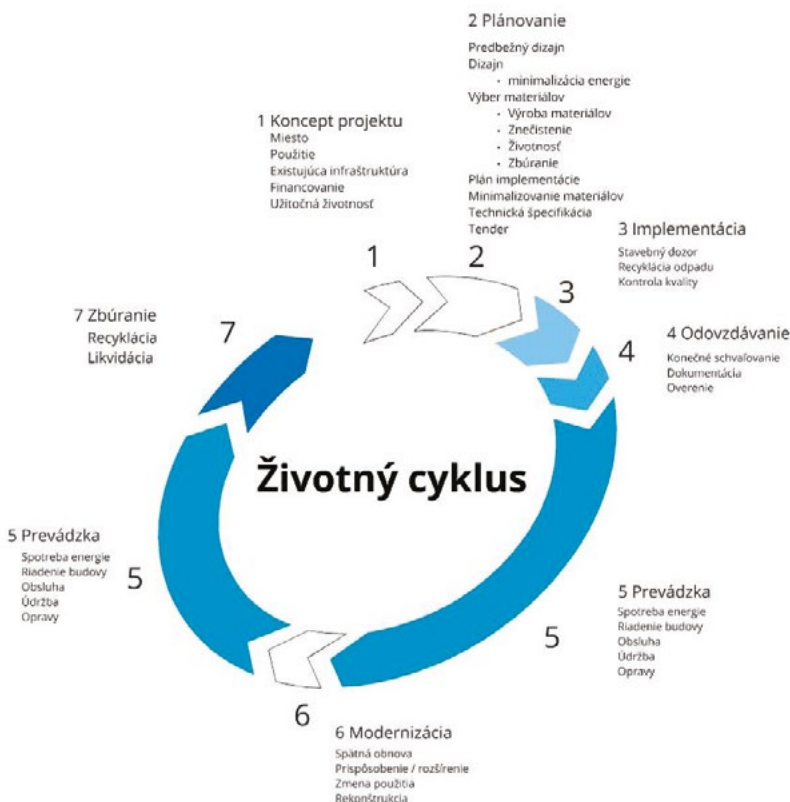
- „Cradle to Grave“ / „Od kolísky po hrob“ alebo
- „Cradle to Gate“ / „Od kolísky k bráne (továrne)“ alebo
- „Cradle to Cradle“ / „Od kolísky ku kolíske“ [7].



Obr. 1 Životný cyklus budov.

Posledná fáza, uzatvára cyklus a tvorí slučku, kde práve táto fáza cyklu predstavuje recykláciu, ktorá je súčasne počiatočnou fázou nového cyklu. Použitím metodiky posudzovania životného cyklu (LCA) v tomto sektore je možné posúdiť a minimalizovať vplyvy na životné prostredie a zlepšiť ukazovatele udržateľnosti [2]. Proces LCA

sa riadi podľa ISO 14000 série medzinárodných noriem zameraných na manažment životného prostredia. Podľa medzinárodnej normy ISO 14040 (Environmentálne manažérstvo – Posudzovanie životného cyklu – Princípy a štruktúra) je LCA „kompiláciou a hodnotením vstupov, výstupov a potenciálnych environmentálnych vplyvov systému výrobkov počas jeho životného cyklu“ [2].



Obr. 2 Životný cyklus budov.

Energetická hospodárnosť

V súčasnosti je energetická účinnosť budov jednou z najväčších starostí, a to z dôvodu vysokých negatívnych dopadov na životné prostredie, hospodárstvo a spoločnosť. V súčasnosti vysoká miera rastu mestských oblastí a zvýšené parametre komfortu spôsobili zvýšenie spotreby energie, čo z nej robí jeden z najväčších problémov súčasnej spoločnosti. Tento problém je spôsobený nadmerným využívaním energie z neobnoviteľných zdrojov, čo má vážne dopady na životné prostredie. Veľká časť spotreby elektrickej energie v obytnom sektore je spojená s vykurovaním a chladením. Preto je nevyhnutné implementovať riešenia zamerané na zvýšenie energetickej efektívnosti budov [9]. Zvyšovanie energetickej hospodárnosti budov sa stalo pilierom energetickej politiky.

Hlavným cieľom je zníženie spotreby energie na zníženie stopy budov. Tento cieľ sa sleduje zavedením obmedzení v oblasti stavebných požiadaviek z hľadiska vlastností základných materiálov a komponentov a využívania obnoviteľných zdrojov energie. Výsledkom je definícia konceptu budovy s nulovou energiou (nZEB - nearly zero-energy building) [10]. Budovu s takmer nulovou potrebou energie ako budovu, ktorá má veľmi vysokú energetickú hospodárnosť a vyžaduje si ju výpočet ukazovateľa primárnej energie. Takmer nula alebo veľmi malé množstvo potrebnej energie, by malo byť pokryté vo veľmi významnej miere energiou z obnoviteľných zdrojov, vrátane energie z obnoviteľných zdrojov vyrobenej na mieste alebo v blízkosti [11].

Základným spôsobom ako zlepšiť energetickú hospodárnosť už existujúcich budov, je dodatočné vybavenie energetickej účinnosťou. Modernizácia energetickej účinnosti budov sa týka zmeny existujúcich zariadení pomocou inovatívnych a efektívnych technológií, pokiaľ ide o obvodový plášť budovy (steny, strecha alebo okná), energetické systémy (kúrenie, chladenie alebo príprava teplej úžitkovej vody), osvetlenie a ďalšie elektrické spotrebiče.

Zlepšení energetickej účinnosti v budovách sa považuje za jedno z najefektívnejších opatrení na zníženie emisií uhlíka, najmä preto, že veľa budov sa vyznačuje zlou energetickou hospodárnosťou [12].

Zníženie uhlíkovej stopy

Výstavba a prevádzka budov v súčasnosti dosahuje až 39% podiel z celkovej produkcie emisií CO₂. Slovensko sa spolu s ďalšími členskými štátmi Európskej únie zaviazalo docieľiť uhlíkovú neutralitu do roku 2050. Rovnováhu medzi emisiami uhlíka a ich pohlcovaním je možné čiastočne riešiť podporou prírodných a umelo vytvorených uhlíkových "zachytávačov", ale najmä redukciou a kompenzáciou týchto emisií investovaním do obnoviteľnej energie, využívaním ekologických technológií a zvyšovaním energetickej účinnosti [13].

Od roku 2020 musia novopostavené budovy patriť do kategórie A0, čo znamená, že sú to budovy s takmer nulovou potrebou energie, ktorá má veľmi vysokú energetickú hospodárnosť. Takmer nulové alebo veľmi malé množstvo energie potrebné na užívanie takej budovy musí byť zabezpečené efektívnou tepelnou ochranou a vo vysokej miere energiou dodanou z obnoviteľných zdrojov nachádzajúcich sa v budove alebo v jej blízkosti, ktoré vo významnej miere znížia uhlíkovú stopu budovy.

Ak budova s takmer nulovou potrebou energie odvádza alebo uskladňuje energiu, zaradi sa do podtriedy A0+. Plusové budovy sú naša budúcnosť, stanú sa štandardom a budeme na ne hľadiť ako na malé elektrárne. Úlohou architekta je vytvárať rozmerovo, esteticky, funkčne a ekonomicky vyvážené, harmonické prostredie, miesto príjemné pre život. Vždy ide o skladbu jednotlivostí, ktoré sú komponované do jedného celku [7].

Udržateľné stavebné materiály

Udržateľná výstavba by mala byť predovšetkým ohľaduplná k životnému prostrediu a šetriť prírodné zdroje. Pri jej realizácii by sa mali používať ekologické stavebné materiály, ktorých výroba bola energeticky úsporná a úsporná by mala byť aj spotreba surovín. Takto postavené budovy by mali mať nízke náklady na energiu a prevádzku, ale zároveň musia byť pohodlné a zdravé pre užívateľa [7]. Industrializácia síce zvýšila životnú úroveň ľudí, ale teraz za to ohrozuje životné prostredie. Výrobné odvetvia vyrábajú odpadový materiál vo veľkých množstvách, pričom sa snažia o elimináciu skleníkových plynov. Tieto odpadové materiály sa ukladajú do pôdy, ktorá znečisťuje pôdu, vodu a vzduch. Na druhej strane stavebníctvo vo veľkom využíva prírodné zdroje na vytvorenie infraštruktúry. To spôsobilo, že niektoré prírodné zdroje sa vytrácajú [14].

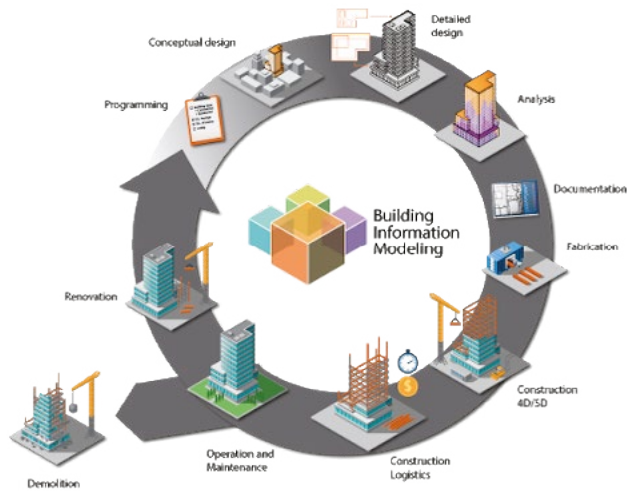
Vytváraním a používaním udržateľných stavebných materiálov, sa znižuje negatívny vplyv na životné prostredie. Dôraz na udržateľnosť prináša veľké zmeny v stavebníctve, najmä pokiaľ ide o podporu udržateľných materiálov a spôsob špecifikácie a výroby betónu, s dôrazom na rýchly presun smerom k použitiu odpadových materiálov pochádzajúcich z priemyslu (napr. Popolček, GGBS (ground-granulated blast-furnace slag - mletá granulovaná vysokopecná troska) a ďalšie kovové trosky), stavebníctva (napr. recyklované kamenivo) a lokálne (napr. spaľovaný popol) odvetvia [15]. S globálnym nárastom v stavebníctve a demolačných môže recyklácia stavebného odpadu ako agregátu, byť zásadným krokom k dosiahnutiu udržateľnosti v betonovej konštrukcii. Asi 30% až 40% tuhého mestského odpadu pochádza zo stavebných a demolačných činností [16]. Drvivé množstvo odpadu C&D (construction and demolition - stavebný a demolačný) generovaného vo forme betónu, tehál a dlaždíc spôsobuje tlak na obmedzený priestor skládok v mestách [17]. Na druhej strane obmedzené prírodné zdroje, ako napríklad čerstvé kamenivo, si vyžadujú využitie recyklovaných alternatív na uspokojenie potrieb stavebného priemyslu [18]. Zvyšujúca sa potreba udržateľnosti v stavebníctve a pohyb obehového hospodárstva sú hnacou silou výskumu recyklácie a opätovného použitia tokov odpadu, ako sú recyklované agregáty (RA) získané drvením odpadov C&D [16].

Green Sense Concrete od spoločnosti BASF prispieva k šetrnosti životného prostredia, vykazuje lepšie vlastnosti a znižuje výrobné náklady. Konštrukcia z udržateľnej betonovej zmesi výrazne znižuje množstvo CO₂. Taktiež aj obsahuje vyšší pomer recyklovaných materiálov [19].

Nové techniky udržateľnej výstavby

Stavebný priemysel a výskumníci skúmajú nové techniky na zlepšenie udržateľnosti budov. Jedným z takýchto riešení je použitie najnovšej technológie, ako je napríklad stavebné informačné modelovanie (BIM) [20]. Technológia výstavby a informačného modelu budovy (BIM) mimo staveniska prináša stavebnému priemyslu výhody v mnohých ohľadoch, napríklad zníženie plytvania materiálom, a vedie k riešeniam smerom k udržateľnej výstavbe [21]. Informačné modelovanie budov (BIM) je založené na 3D modeloch pre spoločnú správu informácií, ktorá vedie inovatívny vývoj transformácie informácií v stavebníctve. V posledných rokoch sa udržateľná výstavba stala horúcou témou stavebného výskumu. S koncepciou trvalo udržateľného rozvoja sa tento typ stavieb zasadzuje za udržateľnú optimalizáciu stavebných modelov a procesov. Výrazným vplyvom BIM modelov sa môže prispieť k udržateľnej výstavbe [22]. Softvérové aplikácie BIM pracujú s „objektmi“, ktoré predstavujú

prvky stavebnej konštrukcie vrátane fyzických komponentov, priestorov, procesov, zúčastnených aktérov a vzťahov medzi týmito objektmi. Nezahŕňa iba geometriu, priestorové vzťahy a oblasti ale aj vlastnosti budovy a jej komponenty [23]. Riešenia BIM môžu prispieť k výberu najlepších riešení na zníženie spotreby energie a zdrojov. Táto nová technológia a prístup môžu tiež generovať potrebu inovatívnejších odborníkov a pracovných príležitostí [24].



Obr. 3 BIM (Building Information Modeling).

3 ZÁVER

Potreba udržateľnej výstavby v súčasnosti je veľmi dôležitá v snahe čo najmenej zaťažovať životné prostredie. Zelené budovy, budovy s takmer nulovou potrebou energie a budovy plusové sa stanú štandardom. Vytváraním udržateľných stavebných materiálov sa znižuje negatívny vplyv na životné prostredie. Neobnoviteľné zdroje energie sú nahrádzané obnoviteľnými zdrojmi. Stavebný priemysel neustále pracuje aj na nových technikách na podporu udržateľnej výstavby ako napríklad BIM. Oblasti, ktoré popisuje tento článok smerujú k zníženiu negatívneho dopadu na životné prostredie. Zelená technológia a jej prienik na trh má veľký význam pre uspokojenie potrieb spoločnosti, ktorý bude pokračovať do budúcnosti bez vyčerpania prírodných zdrojov a ničenia planéty.

Pod'akovanie

Tento príspevok bol finančne podporený slovenským grantom číslo 1/0512/20.

Použitá zdroje

- [1] DING, Grace K.C. Sustainable construction—The role of environmental assessment tools. *Journal of Environmental Management* [online]. 2008, 86(3), 451-464 [cit. 2020-11-12]. ISSN 03014797.
- [2] MOŇOKOVÁ, Andrea a Silvia VILČEKOVÁ. Environmental impact analysis of five family houses in Eastern Slovakia through a life cycle assessment. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering* [online]. 2019, 14(1), 81-92 [cit. 2020-11-12]. ISSN 1338-7278.
- [3] KIBERT, Charles J. *Sustainable construction: green building design and delivery*. John Wiley & Sons, 2016, [cit. 2020-11-12]. ISBN 978-0-470-90445-9.
- [4] JIANG, Wen a Lanjun WU. Green Building Incentive Approach: The Developer Perspective. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [online]. 2019, 237 [cit. 2020-11-12]. ISSN 1755-1315.
- [5] MAO, Xiaoping, Huimin LU a Qiming LI. A Comparison Study of Mainstream Sustainable/Green Building Rating Tools in the World. In: *2009 International Conference on Management and Service Science* [online]. IEEE, 2009, 2009, s. 1-5 [cit. 2020-11-12]. ISBN 978-1-4244-4638-4.

- [6] CHAMIKARA, P. B. S., B. A. K. S PERERA a M. N. N RODRIGO. Competencies of the quantity surveyor in performing for sustainable construction. *International Journal of Construction Management* [online]. 2020, 20(3), 237-251 [cit. 2020-11-12]. ISSN 1562-3599.
- [7] KRAJCSOVICS, L., H. PIFKO a T. PIFKOVÁ. Ukážka energetickej efektívnosti a využitie obnoviteľných zdrojov energie na príklade verejných budov (CEC5, 3sCE412P3), Zručnosti a príklady. *Národný školiaci materiál*.
- [8] PIFKO, Steven, Diego JANCHES, Sigrid CLOSE, Jonathan SPARKS, Takuji NAKAMURA a David NESVORNY. The Meteoroid Input Function and predictions of mid-latitude meteor observations by the MU radar. *Icarus* [online]. 2013, 223(1), 444-459 [cit. 2020-11-12]. ISSN 00191035.
- [9] DA CUNHA, Sandra Raquel Leite a José Luís Barroso DE AGUIAR. Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge. *Journal of Energy Storage* [online]. 2020, 27 [cit. 2020-11-12]. ISSN 2352152X.
- [10] BELUSSI, Lorenzo, Benedetta BAROZZI, Alice BELLAZZI, et al. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. *Journal of Building Engineering* [online]. 2019, 25 [cit. 2020-11-12]. ISSN 23527102.
- [11] KURNITSKI, Jarek, et al. How to define nearly net zero energy buildings nZEB. *Rehva Journal*, 2011, 48.3: 6-12. Dostupné online: https://www.rehva.eu/fileadmin/hvac-dictio/03-2011/How_to_define_nearly_net_zero_energy_buildings_nZEB.pdf.
- [12] HE, Yong, Nuo LIAO, Jiajing BI a Liwei GUO. Investment decision-making optimization of energy efficiency retrofit measures in multiple buildings under financing budgetary restraint. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, 215, 1078-1094 [cit. 2020-11-29]. ISSN 09596526.
- [13] SKGBC, ABS časopis. Úloha stavebníctva v oblasti znižovanie uhlíkovej stopy. Dostupné online: <https://www.asb.sk/stavebnictvo/uloha-stavebnictva-v-oblasti-znizovanie-uhlikovej-stopy>.
- [14] SIDDIQUE, Rafat, Malkit SINGH a Mohit JAIN. Recycling copper slag in steel fibre concrete for sustainable construction. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2020, 271 [cit. 2020-11-12]. ISSN 09596526.
- [15] OBE, Ravindra K. Dhir; LYE, Chao Qun. MOVING FORWARD WITH SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS: AN UNAVOIDABLE CHALLENGE. 2019, [cit. 2020-11-12]. Dostupné online: <https://ukiericoncretecongress.com/ucc2013/files/Proceedings/pdf/1D-R%20K%20Dhir-Keynote-Conf-1.pdf>.
- [16] MISTRI, Abhijit, Sriman Kumar BHATTACHARYYA, Navdeep DHAMI, Abhijit MUKHERJEE a Sudhirkumar V. BARAI. A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, 233 [cit. 2020-11-12]. ISSN 09500618.
- [17] BEHERA, Monalisa, S.K. BHATTACHARYYA, A.K. MINOCHA, R. DEOLIYA a S. MAITI. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, 68, 501-516 [cit. 2020-11-12]. ISSN 09500618.
- [18] CHAKRADHARA RAO, M., S. K. BHATTACHARYYA a S. V. BARAI. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and Structures* [online]. 2011, 44(1), 205-220 [cit. 2020-11-12]. ISSN 1359-5997.
- [19] STEWARDSHIP, Product. Submission for Verification of Eco-efficiency Analysis Under NSF Protocol P352, Part B Green Sense® Concrete Eco-Efficiency Analysis Final Report–April 2013. 2012, [cit. 2020-11-12]. Dostupné online: https://d2evkimvhatqav.cloudfront.net/documents/gsc_eea_methodology_170222.pdf.
- [20] SANTOS, Rúben, António Aguiar COSTA, José D. SILVESTRE a Lincy PYL. Informetric analysis and review of literature on the role of BIM in sustainable construction. *Automation in Construction* [online]. 2019, 103, 221-234 [cit. 2020-11-12]. ISSN 09265805.
- [21] MILOVANOVIC, Bojan. Network for Using BIM to Increase the Energy Performance. In: 40th jubilee international convention on information and communication technology, electronics and microelectronics. 2017, [cit. 2020-11-12]. ISSN
- [22] ZHANG, Lei, Zhenwei CHU a Huanbin SONG. Understanding the Relation between BIM Application Behavior and Sustainable Construction: A Case Study in China. *Sustainability* [online]. 2020, 12(1) [cit. 2020-11-12]. ISSN 2071-1050.
- [23] HÄKKINEN, Tarja; Arto KIVINIEMI. Sustainable building and BIM. In: Proceedings of SB08 Conference Melbourne. 2008, 21-25 [cit. 2020-11-12]. Dostupné online: https://www.rakennustieto.fi/kortistot/rane/material/attachments/5oJ5FjJGF/5xDib83oW/Sustainable_building_and_bim_T_Hakkinen.pdf.
- [24] WONG, Kam-din a Qing FAN. Building information modelling (BIM) for sustainable building design. *Facilities* [online]. 2013, 31(3/4), 138-157 [cit. 2020-11-12]. ISSN 0263-2772.

STRUKTURA NEGRAFICKÝCH DAT PRO VYUŽITÍ LCA V BIM: PŘÍPADOVÁ STUDIE

STRUCTURE OF NON-GRAPHICAL DATA FOR THE USE OF LCA IN BIM: A CASE STUDY

Michal Brandtner^{*1}, Adam Boháček¹

^{*}159111@vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie, mechanizace a řízení staveb, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

Článek se zabývá datovou strukturou pro účely posuzování životního cyklu staveb s využitím informačního modelu budovy (BIM). Posuzování životního cyklu (LCA) je metoda, využitelná pro prokázání vhodnosti navržených materiálů, konstrukcí nebo celých budov z hlediska životního cyklu a jeho působení na životní prostředí. Pro samotné hodnocení LCA je stěžejní obstarat vstupní data pro tzv. inventuru životního cyklu (LCI). Cílem článku je definovat, jakou datovou strukturu je nutné získat z BIM modelu pro účely LCI. Nová metodika je postavena na základě informací z datové struktury standardizace negrafických informací modelu, zvané SNIM. Výhody představené metodiky byly prokázány na případové studii. Tyto výsledky jsou vhodné, pro rozšíření BIM modelu o nová data, nezbytná pro výpočty LCA.

Klíčová slova

Stavebnictví, metoda LCA, BIM model, LCI, SNIM

Abstract

The article deals with the data structure for the purpose of Life Cycle Assessment (LCA) of buildings using the Building Information Model (BIM). LCA is a method that can be used to demonstrate the suitability of proposed materials, structures, or buildings in terms of their whole life cycle and its environmental impact. For the LCA evaluation it is crucial to obtain life cycle inventory (LCI) input data. The aim of the article is to define a BIM data structure for LCI purposes. The new methodology is based on standardization of non-graphic information model data structure called SNIM. Advantages of the proposed methodology have been demonstrated on the case study. These results are useful for expanding the BIM model with new data necessary for further LCA calculations.

Key words

Construction industry, the LCA methodology, the BIM model, life cycle inventory (LCI), SNIM

1 ÚVOD

Posuzování životního cyklu je analytická metoda, založená na hodnocení environmentálních dopadů na životní prostředí výrobků, služeb či technologií. Jedná se o je aktuální téma v souvislosti s požadavkem na udržitelnou výstavbu, který vychází ze Směrnice Evropského parlamentu a Evropské komise č. 305/2011 [1]. Posuzování životního cyklu (LCA) je také metoda, využitelná pro prokázání vhodnosti navržených materiálů, konstrukcí nebo celých budov z hlediska životního cyklu a jeho působení na životní prostředí. Udržitelné využívání přírodních zdrojů souvisí s možnostmi opětovného využití a recyklace použitých materiálů pro výstavbu, ale rovněž s recyklací celých staveb či použití materiálů a surovin šetrných k životnímu prostředí již během nové výstavby.

Kočí [2] popisuje přístup metody LCA k hodnocení environmentálních dopadů na životní prostředí s ohledem na celý životní cyklus produktů, tj. od stádia získávání a výroby prvotních materiálů přes stádium výroby produktů, jejich užívání až po samotné odstranění či opětovné využití produktů v podobě recyklace. Autor Kočí ve své publikaci popisuje životní cyklus produktů, který má různé dopady na životní prostředí, ve čtyřech hlavních stádiích. První stádium získávání surovin pro výrobu potřebných materiálů pro výrobu produktu zahrnuje těžbu ropy, železný rud či dřeva a jejich dopravu z místa, kde jsou získávány, do místa dalšího zpracování. Druhé stádium popisuje výrobu produktu z již získaných materiálů a surovin v prvním stádiu. Stádium zahrnuje

přeměňování získaných surovin na materiály, které jsou použitelné v další průmyslové výrobě. Přeměňování surovin zahrnuje například také spotřebu elektrické energie či různých paliv. Třetí stádium užívání produktu zahrnuje spotřebu produktu či jeho využití pro funkci, ke které byl vyroben. Nedílnou součástí tohoto stádia jsou opět energetické a surovinové požadavky, které budou sloužit pro samotný provoz produktu a jeho případné opravy, uskladnění či údržbu. Čtvrté, poslední stádium, popisuje již závěrečné odstranění produktu včetně energetických a materiálových nároků na odstranění produktu či případně na jeho recyklaci. Životní cyklus produktů a hodnocení jejich dopadu na životní prostředí pomocí tzv. kategorií dopadu Kočí dále dělí na šest konkrétních oblastí: (i) Globální oteplování a klimatické změny, (ii) Úbytek stratosférického ozonu, (iii) Acidifikaci, (iv) Eutrofizaci, (v) Vznik fotooxidantů a (vi) Úbytek surovin. Každá z těchto kategorií dopadu zahrnuje procesy a důsledky, jakými je negativně ovlivňováno životní prostředí [2].

2 POPIS SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Při provádění studií LCA ve stavebnictví je nutno shromáždit určité množství dat o budově. K tomuto účelu je možné za určitých podmínek využít informační model budovy (Building Information Model – BIM), který obsahuje kromě geometrické části rovněž informační část.

V roce 1990 se poprvé objevuje komplexní environmentální analýza zátěží, modely plnohodnotného hodnocení životního cyklu a s nimi spojená kalkulace životního cyklu. Začátkem 21. století byl vytvořen program Life Cycle Initiative, jehož cílem bylo praktikovat myšlenky životního cyklu do praxe [3].

Propojením metody LCA s možností využití datové struktury BIM modelu se již zabývalo mnoho autorů. Antón [4] v závěru článku představila dva přístupy integrace mezi LCA a BIM. Jeden z nich je posouzení celého životního cyklu konstrukce a druhý přístup je materiálově orientovaný.

Autoři dalšího článku [5] přichází s metodou automatických výpočtů LCA v rané fázi, tedy již na první úrovni podrobnosti BIM (LOD100). To by mělo vést k lehčím úpravám výpočtů během dalšího vývoje BIM modelu. K tomu, aby bylo možné tohoto cíle dosáhnout, je potřeba nových vrstev dat a jejich formátů. Tato nová datová vrstva by měla vyplnit informační mezery mezi extrahovanými daty BIM a stávajícími daty LCA, poskytovanými běžnými databázemi. Výsledkem tohoto článku je přiblížení této metody a dalším doporučeným krokem je testování této metody v budoucích vědeckých pracích.

Efektivita analýzy životního cyklu je řešena v dalším článku [6]. Autoři tohoto článku se zabývají propojením mezi nástrojem založeným na přístupu BIM a nástrojem LCA za využití software Gabi 6. V článku bylo prokázáno, že BIM plug-in modul může poskytnout potřebná data pro každou fázi návrhu. To znamená, že projektant má možnost provést plnou analýzu životního cyklu mnohem efektivněji.

Posuzování životního cyklu budov v souvislosti s využitím BIM, analýzou předchozích přístupů a shrnutím základních informací o této problematice se věnoval článek autora M. Brandtnera [7]. Tento článek navazuje na shrnuté poznatky a závěry z tohoto příspěvku.

Problematikou BIM se zabýval také Jarský a kol. [8] v publikaci věnované přípravě a realizaci staveb. V publikaci je zmínka o možnosti využití BIM modelu pro demonstraci celého životního cyklu budovy včetně procesu výstavby a provozu staveb. Téma propojení externích dat s BIM modely za předpokladu přidání dalšího datového rozměru k BIM modelu je popsáno v kapitole věnující se nD BIM modelům.

Na základě výše uvedených referencí lze konstatovat, že autoři se již v minulosti zabývali možnostmi propojení studií LCA s informacemi obsaženými ve 3D modelu, který je součástí prostředí BIM.

3 METODIKA

Pro posouzení životního cyklu produktů s možností hodnocení jejich dopadu na životní prostředí metodou LCA je potřeba stanovit hodnoty jednotlivých indikátorů kategorií dopadu s ohledem na jednotlivá stádia životního cyklu produktů. Tyto hodnoty, tvořící soubor výsledků, musí mít kromě konkrétních hodnot, také jednoznačně definované jednotky. Jednotlivé soubory výsledků jsou poté přiřazeny do konkrétních druhů kategorií dopadu, které mají různé vlivy na životní prostředí. V grafické a informační části BIM modelu stavebního díla jsou jednoznačně definovány parametry, které je možno využít pro hodnocení LCA. V souvislosti se standardizací negrafických informací modelu a se vznikem již zmíněných standardů a parametrů se nabízí možnost doplnění BIM modelu o konkrétní informace ze SNIM pro komplexní posouzení stavebního díla z hlediska jeho celého životního cyklu (LCA).

Standardizace negrafických informací 3D modelu neboli zkráceně SNIM je soubor informací a standardů, které byly vyvinuty zejména pro projektování s využitím BIM modelu v prostředí České republiky. K jednotlivým prvkům 3D modelu byly přiřazeny parametry (negrafické informace), které jsou dále rozděleny dle požadavků pro jednotlivé stupně projektové dokumentaci v souvislosti s danou fází výstavby. SNIM obsahuje seznam parametrů,

kteří jsou přiřazeny ke konkrétním konstrukcím a třídění stavebních konstrukcí, který jednotlivé typy konstrukcí rozděluje dle technických a parametrických informací. Třídění stavebních konstrukcí byl vytvořen z důvodu snahy o lepší orientaci v projektu za pomoci databázového vyhledávání.

Metoda výběru dat z prostředí SNIM je popsána ve fázi studie výstavby. Z databáze SNIM budou převzaty objemy jednotlivých konstrukcí a takzvaná data "syntaxe značení" obsahující značení konstrukcí. Data "syntaxe značení" ze SNIM budou použita pro účely základní strukturu LCI (studie LCA). Nejsou v těchto datech obsaženy indikátory kategorií dopadu (emise). Proto se musí přiřadit z externích zdrojů (databáze / individuálně zjištěná data od výrobců / producentů materiálu / výrobků). Příklad vzhledu datové struktury pro jednu kategorii materiálu je uveden v tabulce 1.

Tab. 1 Příklad vzhledu datové struktury pro jednu kategorii materiálu.

	Značení dle SNIM	Podkategorie	Popis	MIN	MAX
Typ konstrukce	XX000	Specifikace konstrukce	000	000

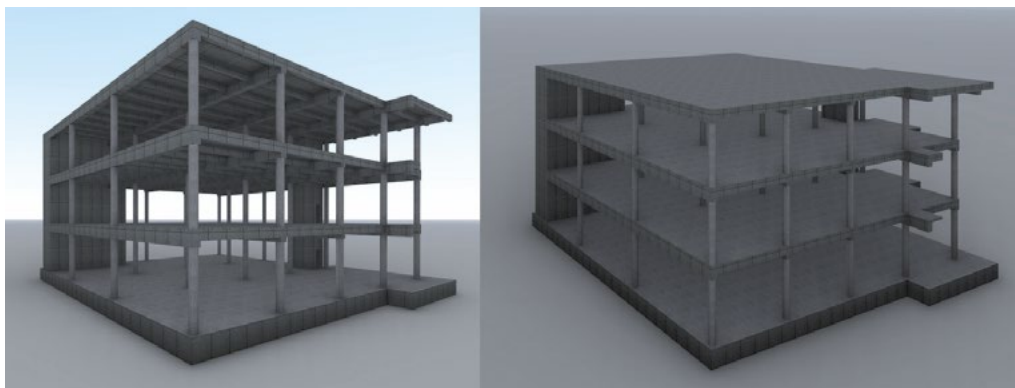
V rámci hodnocení byly uvažovány emise následujících látek: CO₂, SO₂, NO_x, CO, CH₄, N₂O, HCl a HF. Množství těchto emisí bylo uvažováno v pěti kategoriích dopadu pro oblast České republiky. Jedná se o potenciál globálního oteplování (GWP), acidifikační potenciál (AP), eutrofizační potenciál (EP), úbytek stratosférického ozónu (ODP) a potenciál vzniku fotooxidantů (POCP). Indikátory kategorií dopadu byly převzaty ze softwaru Gabi [13] z externí databáze EPD, která zahrnuje 3 kategorie: A1 – raw material supply, A2 – transport, A3 – core processes. Převzaty byly indikátory kategorií dopadu pro typy betonů obsažené v referenčním objektu dle jejich třídy, pevnosti a stupně vlivu prostředí.

Pro klasifikaci těchto dat bylo využito maticového řešitele Matlab. Vstupní data pro řešení jsou dvě tabulky. Jedná se o tabulku syntaxi značení a tabulku indikátorů dopadu. První je tabulka prvků, která obsahuje název prvku, jeho objem, pevnost a stupeň vlivu prostředí. Druhá tabulka obsahuje hodnoty indikátorů kategorií dopadu (LCI) pro každý typ betonu a stupeň vlivu prostředí. Indikátory kategorií dopadu jsou CO, Nox, Sox, CH₄, CO₃, N₂O, HCl a HC.

Nejdříve je načten první řádek prvků, ze kterého se vezme objem prvku, pevnost betonu a stupeň vlivu prostředí. Na základě pevnosti betonu a stupně vlivu prostředí je z druhé tabulky přiřazena konkrétní hodnota LCI. Obecně MatLab přiřadí hodnotu LCI pro každý stupeň vlivu prostředí, ale pro tento konkrétní příklad je uvažováno pro všechny prvky pouze se stupněm vlivu prostředí XC1. Přiřazená hodnota LCI je pouze pro objem 1 m³ betonu, proto jsou všechny hodnoty vynásobeny hodnotou objemu daného prvku. Objem každého konkrétního prvku vynásobený příslušnou hodnotou LCI je vygenerován do nové tabulky, ze které jsou postupně filtrovány další informace. Při zadání hodnoty konkrétního typu (pevnosti) betonu (např. C 20/25) je vygenerována hodnota LCI konkrétního prvku z daného betonu. V dalším kroku jsou všechny hodnoty LCI pevnosti betonu jsou sečteny a výsledné hodnoty jsou přeneseny do grafu. Proces je opakován pro všechny zvolené typy betonu (v našem případě 3 typy) a poté podle jednotlivých hodnot LCI jsou vytvořeny grafy – co jeden prvek LCI, to jeden graf.

4 PŘÍPADOVÁ STUDIE

Případová studie je zaměřena na hrubou stavbu reálného objektu ŽB skeletu knihovny ve fázi studie výstavby s daty pro DSP ze SNIM. Jedná se o objekt vymodelovaný v Revitu (BIM model), který byl následně převeden do programu Lumion, ve kterém byla vytvořena vizualizace. Pro účely výpočtu byly z BIM modelu převzaty objemy jednotlivých konstrukcí tvořící hrubou stavbu objektu. Jedná se o samostatně stojící stavbu se třemi nadzemními podlažními. Půdorys objektu je ve tvaru čtverce s vystupující severní částí. Z hlediska stavebního řešení se jedná o monolitický železobetonový skelet založený na základové desce o mocnosti 800–1200 mm. Stropní konstrukci tvoří trámový strop podepřený příčlemi a desky vyztužené v jednom směru. Stropní konstrukci podpírají monolitické železobetonové sloupky kruhového průřezu z betonu C 20/25 – XC1 o průměru 500 mm a monolitické ztužující stěny z betonu C 20/25 – XC1 tloušťky 250 a 300 mm tvořící ztužující jádra v místech budoucího schodiště a výtahu. Stropní monolitická konstrukce je tvořena deskou o mocnosti 200 mm vyztuženou v jednom směru a podepřenou výztužnými trámy o šířce 250 mm, výšce 400 mm a výztužnou příčlí ve směru druhém širokou 500 mm o výšce 700 mm. Jedná se tedy o trámový strop podepřený příčlemi s deskou vyztuženou v jednom směru. Z hlediska materiálu je celá stropní konstrukce navržena z betonu C 25/30 – XC1 s betonářskou výztuží B 500B. Přístup do jednotlivých podlaží objektu je zajištěn pomocí ŽB schodiště z betonu C 30/37 – XC2.



Obr. 1 Referenční objekt: Monolitická železobetonová skeletová konstrukce knihovny [vlastní práce autorů].

Tab. 2 Data „syntaxe značení“.

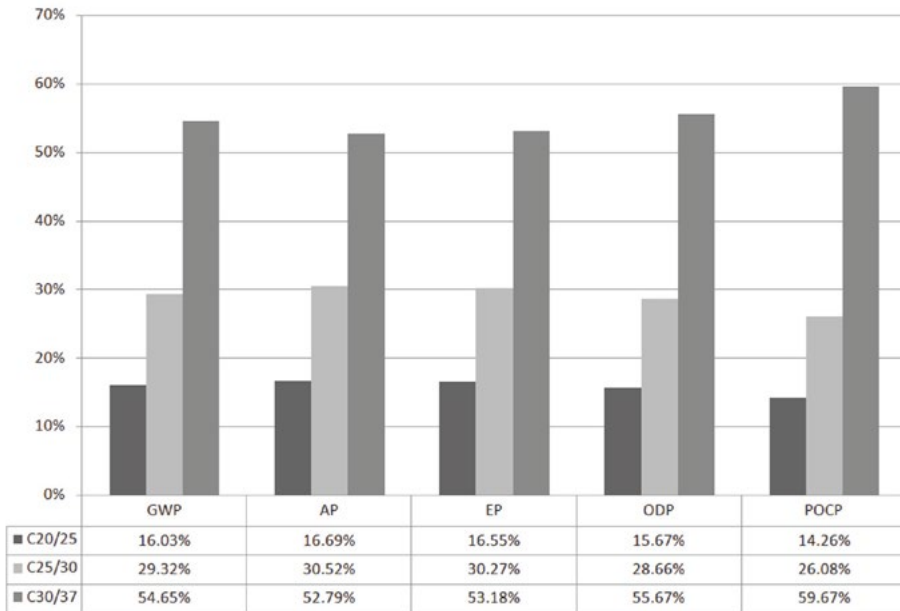
Typ konstrukce	Značení dle SNIM	Podkategorie	Popis	Celkový objem (m ³)	Objemová hmotnost (kg/m ³)	Třída a pevnost betonu	Stupeň vlivu prostředí
Základy	ZD 220	Monolitické	Monolitické	736,54	2400	C30/37	XC2
Sloupy	SL 100	Monolitické	Monolitické	50,55	2300	C20/25	XC1
Stěny	SN 250	Monolitické	Monolitické	64,55	2300	C25/30	XC1
Průvlaky (příčle)	TM 100	Monolitické	Hranatý průřez	240,71	2300	C20/25	XC1
Stropní deska	SK 100	Monolitická	Dimenze 200 mm	468,15	2300	C25/30	XC1
Schodiště	NA	Monolitické	-	26,52	2400	C30/37	XC2

Tab. 3 Data „indikátorů dopadu“.

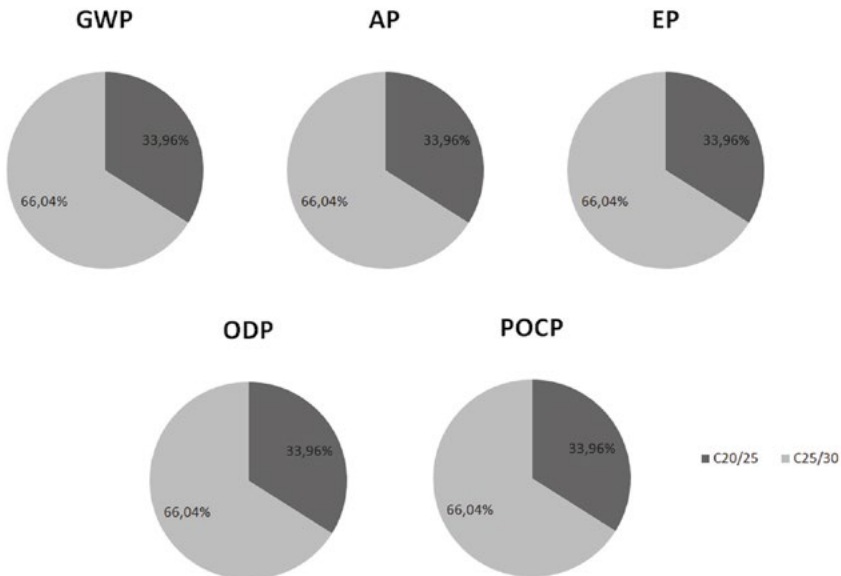
Typ konstrukce	Značení dle SNIM	Materiál	GWP (kg CO ₂ ekv.)	AP (kg SO ₂ ekv.)	EP (kg PO ₄ ³⁻ ekv.)	ODP (kg R11 ekv.)	POCP (kg C ₂ H ₄ ekv.)
Základy	ZD 220	C30/37 – XC2	1,13E-01	1,99E-04	3,22E-05	2,43E-16	8,19E-06
Sloupy	SL 100	C20/25 – XC1	9,06E-02	1,72E-04	2,74E-05	1,87E-16	5,35E-06
Stěny	SN 250	C25/30 – XC1	9,06E-02	1,72E-04	2,74E-05	1,87E-16	5,35E-06
Průvlaky (příčle)	TM 100	C20/25 – XC1	9,06E-02	1,72E-04	2,74E-05	1,87E-16	5,35E-06
Stropní deska	SK 100	C25/30 – XC1	9,06E-02	1,72E-04	2,74E-05	1,87E-16	5,35E-06
Schodiště	NA	C30/37 – XC2	1,13E-01	1,99E-04	3,22E-05	2,43E-16	8,19E-06

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

Výsledky výpočtu ukazují procentuální zastoupení kategorií dopadu pro každý typ betonu. Každý závěrečný graf obsahuje součtové hodnoty LCI pro všechny 3 typy betonů. Graf ukazuje procentuální vliv každého betonu o konkrétní pevnosti neboli ukazuje, který beton má největší podíl LCI. Závěr je procentuální rozložení jednotlivých emisních faktorů napříč betonovým zastoupením (materiálovou charakteristikou) ve stavbě. Tyto výsledky jsou vhodné, pro rozšíření BIM modelu o nové data, nezbytné pro výpočty LCA. Model BIM, rozšířený o výpočet LCA, povede ke snížení těžby přírodních zdrojů a také k pozitivnímu dopadu na životní prostředí.



Obr. 2 Graf procentuálního zastoupení LCI pro celý objekt s ohledem na rozložení druhů betonů.



Obr. 3 Graf procentuálního zastoupení LCI, příklad pro stupeň vlivu prostředí XC1.

6 ZÁVĚR

Článek shrnuje teorii, současný stav řešené problematiky a také rámcový postup, jakým je možné v budoucnu přistupovat při výpočtech environmentálních dopadů u konkrétních objektů. Zvolená případová studie ověřila navrženou metodiku a ukázala nutnost zpracování mnohem většího počtu případových studií konkrétních objektů,

jejichž výsledky by mohly být vzájemně porovnány. Zpracování dalších studií, porovnání výsledků těchto studií s již vypočtenými hodnotami a porovnání výsledků s prezentovanými výsledky jiných autorů je doporučeno jako předmět dalšího výzkumu této problematiky. Při ověřování navržené metodiky na konkrétní případové studii byly zjištěny zejména nedostatky v oblasti zdrojových dat pro možnost importu hodnot environmentálních dopadů do konkrétních prvků a konstrukcí do BIM modelu řešeného objektu. Bylo by vhodné se do budoucna zabývat rozšířením databáze hodnot LCI zejména pro české prostředí. Ukázalo se také, že ne všechny prvky v objektu lze přiřadit ke konkrétním kategoriím SNIM. Proto by v případě zpracovávání studií pro složitější objekty bylo nutné doplnit některé konkrétní prvky do databáze SNIM. V neposlední řadě by bylo rovněž vhodné vytvořit specializovaný software nebo plug-inu, zabývající se výpočty LCA a propojením studií LCA s BIM modelem pro české prostředí, který bude snadno využitelný ve stavební praxi.

Poděkování

Článek vznikl za podpory Standardního specifického výzkumu s registračním číslem FAST-S-20-6338 a Juniorského specifického výzkumu s registračním číslem FAST-J-20-6359.

Použité zdroje

- [1] REGULATION (EU) No 305/2011 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL: laying down harmonized conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC. In: Strasbourg: European Council, 2011, ročník 2011, 305/2011.
- [2] KOČÍ, Vladimír. LCA a EPD stavebních výrobků: posuzování životního cyklu a environmentální prohlášení o produktu jako cesta k udržitelnému stavebnictví. Praha: Česká rada pro šetrné budovy, 2012. ISBN 978-80-260-3504-6.
- [3] Jeroen B. Guinée et al. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environ. Sci. Technol.*, 2011, 45, 90-96. DOI: 10.1021/es101316v.
- [4] ANTÓN, Laura Álvarez a Joaquín DÍAZ. Integration of Life Cycle Assessment in a BIM Environment. *Procedia Engineering*. 2014, 85, 26-32. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.525. ISSN 18777058.
- [5] DUPUIS, M., A. APRIL, P. LESAGE a D. FORGUES. Method to Enable LCA Analysis through Each Level of Development of a BIM Model. *Procedia Engineering*. 2017, 196, 857-863. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.08.017. ISSN 18777058. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817331375>
- [6] BUENO, Cristiane a Márcio Minto FABRICIO. Comparative analysis between a complete LCA study and results from a BIM-LCA plug-in. *Automation in Construction*. 2018, 90, 188-200. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.02.028. ISSN 09265805. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580518301249>
- [7] BRANDTNER, M. Posuzování životního cyklu budov založené na BIM – rešerše. *Juniorstav 2020*, 22. odborná konference doktorského studia, sborník příspěvků. Brno: ECON publishing, 2020, (1), 5. ISSN 978-80-86433-73-8.
- [8] JARSKÝ, Čeněk. *Technologie staveb II. Druhý přepracované a doplněné vydání*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2019. ISBN 978-80-7204-994-3.

POROVNÁNÍ UHLÍKOVÉ STOPY MATERIÁLU HYDROAKUMULAČNÍ VRSTVY PŘEDPĚSTOVANÝCH VEGETAČNÍCH PANELŮ

COMPARISON OF CARBON FOOTPRINT OF HYDROACCUMULATION LAYER MATERIAL OF PRE-GROWN VEGETATION PANELS

Lukáš Bríza^{*,1}

*Lukas.Briza@vut.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie, mechanizace a řízení staveb, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

V době globálních změn klimatu a nutnost zavedení udržitelnosti do všedního života, přichází stavebnictví s inovativními řešeními. Jeden ze způsobů je používání vegetačních konstrukcí, který lidmi budovaného objekty přibližují přírodě. V tomto článku dojde k porovnání dvou typově podobných systému předpěstovaných střešních vegetačních panelů z pohledu jejich uhlíkové stopy. Z hlediska množství svázaných emisí budou posouzeny materiály použité na retenční vrstvy těchto systémů. Hodnoty k určení uhlíkové stopy budou převzaty z veřejně dostupných online databází. Následnou interpretaci výsledků by měla být dokázána výhodnost předpěstovaných vegetačních panelů vyvíjených na půdě výzkumného střediska ADMAS při VUT v Brně, které využívají retenční desky z recyklovaných polyesterových vláken.

Klíčová slova

Předpěstovaný vegetační panel, retenční deska, uhlíková stopa, svázané emise, porovnání

Abstract

At a time of global climate change and the need to introduce sustainability into everyday life, the construction industry is coming up with innovative solutions. One way is to use vegetation structures, which bring people-built objects closer to nature. In this article, two types of similar systems of pre-grown roof vegetation panels will be compared from the point of view of their carbon footprint. The materials used for the retention layers of these systems will be assessed in terms of the amount of bound emissions. The values for determining the carbon footprint will be taken from publicly available online databases. Subsequent interpretation of the results should prove the advantage of pre-grown vegetation panels developed on the premises of the ADMAS research center at BUT, which use retention boards made of recycled polyester fibers.

Key words

Pre-grown vegetation panel, retention plate, carbon footprint, tied emissions, comparison

1 ÚVOD

Čím dál tím častěji slyšíme o globálních změnách klimatu a s tím související problematice zatěžování životního prostředí. Jedním z ukazatelů zatěžování životního prostředí je celková ekologická stopa. Odvozeným, zato více propagovaným, ukazatelem je pak uhlíková stopa. Uhlíková stopa je suma vypouštěných skleníkových plynů vyjádřená v CO₂ ekvivalentech. Skleníkové plyny pak nepříznivě přispívají neblahému efektu známému jako skleníkový jev. Je proto jasné, že by nás uhlíková stopa měla patřičně zajímat. V současné době se sleduje uhlíková stopa jak v dopravě, u produkce potravin a textilu či u jedince, kde její velikost vyplývá z jeho životního stylu. Uhlíkovou stopu je možné určit také pro stavební materiály. Těžba surovin, výroba, doprava, konstrukce, použití a také fáze likvidace stavebních materiálů spotřebovávají značné množství energie, z nichž každá vytváří související uhlíkovou stopu.

Při snaze maximální mírou přispět ke zlepšení životního prostředí a dosažení udržitelnosti se přichází ve stavebnictví s řešeními, jako jsou například zelené vegetační střechy nebo případně vegetační stěny apod. Není

ovšem správně automaticky předpokládat pozitivní přínos všech konstrukcí, které se označují jako vegetační a na první pohled jsou blízké přírodě. Za vnikem těchto konstrukcí stále stojí stavební průmysl, který je velkým producentem skleníkových plynů, v našem případě konkrétně oxidu uhelnatého (CO₂).

V tomto článku dojde tedy k porovnání použitých retenčních materiálů u dvou odlišných skladeb zelené vegetační střechy. Pojítkem pro obě konstrukce, a tedy i důvodem k jejich výběru, je společná snaha o prefabrikaci konstrukcí zelených vegetačních střech. Posuzovány jsou právě ty materiály, u nichž se předpokládá vyšší uhlíková stopa než u ostatních materiálů a zároveň je u materiálu potenciálně ke snížení uhlíkové stopy.

Pro případ šetření se předpokládá, že ostatní vrstvy vegetačního souvrství mají stejnou, nebo podobnou uhlíkovou stopu. Závěr proto bude vyvozen pouze na základě porovnání hydroakumulačních vrstev, u kterých bude určena uhlíková stopa s přesností umožněné na základě běžně dostupných informací.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Český trh, potažmo nabídka na českém trhu s prefabrikovanými předpěstovanými vegetačními panely není příliš široká. Jedná se o okrajový segment celku vegetačních konstrukcí. Jde tedy o vhodné místo poptávky veřejnosti, které je třeba zaplnit plnohodnotnými produkty. V současné době trhu dominuje jediné systémové řešení, zatímco v rámci výzkumné skupiny vedené Ing. Martinem Mohaplem Ph.D., působící na Ústavu technologie, mechanizace a řízení staveb Fakulty stavební, je již několik let vyvíjen prefabrikovaný předpěstovaný střešní vegetační panel. Oba tyto systémy jsou předmětem dalšího posuzování z hlediska své uhlíkové stopy.

Předpěstovaný vegetační panel z VUT

Na půdě výzkumného střediska ADMAS se nachází několik sestavených předpěstovaných střešních vegetačních panelů, které jsou výsledkem 4 let výzkumné práce týmu vedeného Ing. Mohaplem Ph.D. Předpěstovaný vegetační panel kompromisem kombinuje systém půdorysně malých a velkých panelů. Bylo tedy přistoupeno ke konstrukci s půdorysně větší základnou s maximálním možným odlehčením za pomoci extenzivního typu zelené střechy.

Panel je tak vytvořen ze základové desky z extrudovaného polystyrenu XPS o výšce 100 mm o půdorysných rozměrech 1200 × 600 mm. Na desce z extrudovaného polystyrenu XPS je vytvořena hydroakumulační vrstva z retenčních desek z recyklovaných polyesterových vláken. Právě tato vrstva je předmětem posouzení a porovnání z hlediska uhlíkové stopy. Výška hydroakumulační vrstvy je 40 mm. Na retenční desce se nachází substrátový vak tvořený obalovým materiálem z jutové sítě, která je po obvodu vyztužena dřevěnou konstrukcí z latí 48 x 24 mm a vyplněna substrátem. Maximální vodní kapacita panelu je 29 l/m² [1].



Obr. 1 Předpěstovaný vegetační panel v areálu výzkumného střediska ADMAS.

Předpěstovaný kompletní systém zelené střechy ECOSSEDUM®PACK

Konkurenční, na trhu uváděný, systém zelené střechy ECOSSEDUM®PACK je předpěstovaný střešní vegetační panel. Systém se skládá z tzv. zásobníků, které se skládají dohromady. Jednotlivé zásobníky mají půdorysný rozměr 600 × 400 mm, jedná se tedy spíše o menší panely určené pro ruční manipulaci. Zásobník, který svojí stavbou připomíná včelí pláštěv je vyroben z polyethylenu (PE) a polypropylenu (PP) při garanci 100% recyklovatelnosti. Samotná konstrukce zásobníku, který je vyplněn substrátem a předpěstovanými sukulenty, se

osazuje přímo na střešní hydroizolaci. Maximální vodní kapacita panelu (retence vody) je 32 l/m^2 . Konstruktivní dispozicí je hydroakumulační vrstva tvořena dnem zásobníku. Posuzovaný materiál retenční vrstvy je v tedy v tomto případě materiál zásobníku – PE a PP [2].



Obr. 2 Schématický řez předpřestovaným zásobníkem ECOSEDUM®PACK.

3 METODIKA

Základní metodikou pro hodnocení environmentální kvality produktu je hodnocení životního cyklu – LCA (Life Cycle Assessment). Tato metodika je použitelná na jakýkoliv produkt lidské činnosti, tedy i stavební materiály. Z LCA vychází všechny v současnosti používané metody posuzování environmentálních vlastností stavebních produktů. Liší se především zvolenými systémovými hranicemi a použitou databází. Jednotlivé životní cykly stavebního materiálu jsou:

- Těžba suroviny (včetně jejich dopravy do výroby finálního produktu)
- Výroba materiálu
- Doprava materiálu na stavbu
- Zabudování materiálu do stavby
- Údržba materiálu během jeho životnosti
- Likvidace materiálu po dožití
- Recyklace materiálu

Z předchozího popisu lze odhadnout, že se jedná o poměrně složitý proces, ke kterému je potřeba mnoho dat. Do jaké hloubky zkoumat jednotlivé procesy je určeno hranicemi systému. Tyto hranice systému například určují:

- Které procesy výroby zahrnout a které již ne
- Zda jak zahrnout dopravu prvků (průměrné a přesné hodnoty)
- Jak zahrnout údržbu, opravy zabudovaného prvku (stanovení předpokládaného vývoje)
- Jaké hodnoty uvažovat po dožití prvku (predikce budoucnosti – neznámé budoucí technologie recyklace, životnost budovy, ...)

Při hodnocení dopadů "života materiálu" by do posuzování měly vstupovat údaje z celého jeho životního cyklu. Takovýto přístup by pak využíval hranice systému "Cradle to Grave", neboli od kolébky do hrobu, které zahrnují všechny fáze životního cyklu výrobku od těžby primárních surovin, přes výrobu, dopravu, zabudování, až po likvidaci. V poslední době se zmiňuje dokonce přístup "Cradle to Cradle", tedy uzavřený životní cyklus výrobků zahrnující i jejich recyklaci.

Ve skutečnosti je velmi složité u každého materiálu vyčíslit fáze životního cyklu od dopravy z výroby na staveniště až po jeho likvidaci, případně recyklaci, a to především z důvodu nedostatku přesných dat. Jedná se v podstatě o predikci budoucnosti za 50 či více let.

Do hodnocení stavebních materiálů se proto zpravidla zahrnují pouze prvotní dvě fáze životního cyklu – těžba surovin a výroba materiálu, tj. využívají se systémové hranice "Cradle to Gate".

Samotný výpočet uhlíkové stopy produktu je tedy opravdu komplikovaný a silně ovlivnitelný vstupními daty. Při porovnávání zvolených hydroakumulačních (drenážních) materiálů nebude prováděn samotný výpočet uhlíkové stopy, ale bude využito veřejně dostupných databází. Hodnoty uhlíkové stopy budou převzaty od stejných, či velmi blízce podobných materiálů, které jsou obsaženy v těchto veřejných databázích (katalozích) materiálů [3].

4 VÝSLEDKY

V tabulce Tab.1 se nachází přehled materiálů používaných v drenážních vrstvách vegetačních střešních konstrukcí z posuzovaných předpěstovaných panelů a k nim vztaženou hodnotu svázaných emisí v CO₂ ekv./kg. Polypropylenový granulát a polyetylen LDPE a HDPE zastupují komerční panel systému ECOSEDUM®PACK. Zatímco panel vyvíjený na VUT v Brně, ve výzkumném středisku ADMAS, je zastoupen polyesterovými vlákny z recyklátu.

Tab. 1 Množství svázaných emisí CO₂ v CO₂ ekv./kg pro materiály drenážních vrstev vegetačních střešních konstrukcí z předpěstovaných panelů [4], [5].

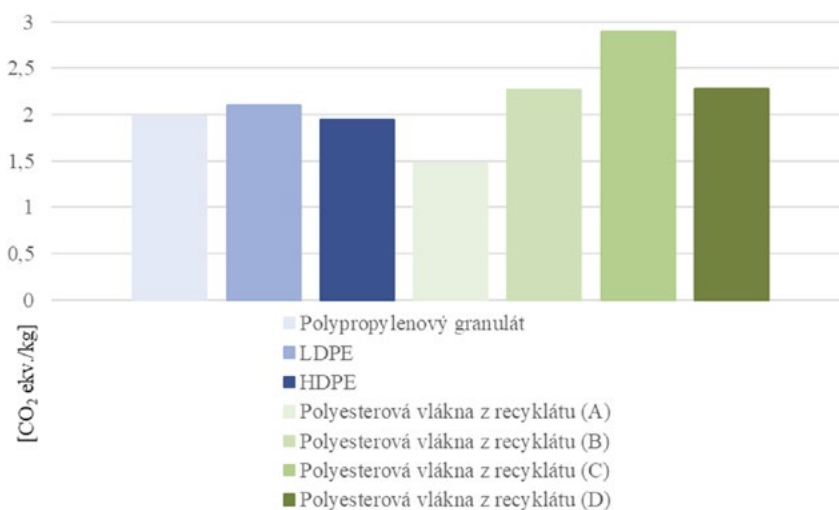
	Svázané emise CO ₂ (GWP) [CO ₂ ekv./kg]
Polypropylenový granulát	1,9825
Polyetylen LDPE	2,1026
Polyetylen HDPE	1,9485
Polyesterová vlákna z recyklátu (A)	1,479
Polyesterová vlákna z recyklátu (B)	2,265
Polyesterová vlákna z recyklátu (C)	2,896
Polyesterová vlákna z recyklátu (D)	2,279

V tabulce Tab.2 jsou uvedeny odlišnosti v množství polyethylentereftalátu (PET) ve složení polyesterových vláken z recyklátu a procentuální poměr zastoupení recyklátu v PET. Tabulka se vztahuje k materiálu používaného u panelu vyvíjeného ve výzkumném středisku ADMAS.

Tab. 2 Množství použitého Polyesteru PET a jeho míra zrecyklování v polyesterových vláknech [5].

	Množství PET [%]	Z toho recyklát PET [%]
Polyesterová vlákna z recyklátu (A)	81	100
Polyesterová vlákna z recyklátu (B)	100	37
Polyesterová vlákna z recyklátu (C)	100	17
Polyesterová vlákna z recyklátu (D)	77	100

Na obrázku Obr.3 je graficky vyvedeno srovnání uhlíkové stopy posuzovaných materiálu. Na vertikální ose jsou zaneseny hodnoty svázaných emisí v CO₂ ekv./kg.



Obr. 3 Graf znázorňující hodnoty svázaných emisí v CO₂ ekv./kg pro posuzované materiály.

5 ZÁVĚR

Je zřejmé, že určení uhlíkové stopy stavebního materiálu není zcela jednoduchý a jednoznačný proces. Online databáze značně zkracují a zjednodušují celý proces, především tím že odpadá nutnost vlastních výpočtů. Nicméně výsledky jsou převážně založeny na podobnosti reprezentovaných materiálů.

Pokud se jedná o komerční předpřestovaný vegetační střešní panel ECOSEDUM®PACK není zcela zásadní, zda je zásobník vyroben z materiálu více podobnému polypropylénovému granulátu, nebo LDPE či HDPE. Všechny tři suroviny mají přibližně stejnou uhlíkovou stopu, když se jejich množství svázaných emisí pohybuje kolem 2,0 CO₂ ekv./kg. Ekvivalentem této hodnoty může být produkce jednoho syrového steaku [6].

Na rozdíl u panelu vyvíjeného na půdě výzkumného střediska ADMAS při VUT v Brně jsou suroviny použité k výrobě vegetačně-retenční desky AQUADESK zcela zásadní. Deska tvořená z 81 % stoprocentním recyklátem PET zanechává uhlíkovou stopu v podobě svázaných emisí pouze 1,479 CO₂ ekv./kg (ekvivalent produkce páru sandálů Crocs [6]). Zatímco deska tvořená zcela z PET s obsahem jen 17 % recyklátu zanechává uhlíkovou stopu v podobě svázaných emisí 2,896 CO₂ ekv./kg (ekvivalent produkce nylonových kalhot [6]).

Pro srovnání obou systémů se předpokládá vyšší míru obsahu recyklátu ve vegetačně-retenční desce AQUADESK (která se prezentuje především použitím recyklátu) a použití LDPE plastu k výrobě zásobníku ECOSEDUM®PACK. Z jednoduchého porovnání dvou cifer je možné konstatovat, že předpřestovaný vegetační panel z VUT v Brně zanechává menší uhlíkovou stopu a je tak více ekologický. Posouzení je založeno na srovnání materiálů použitých pro retenční vrstvu a platí za předpokladu stejné uhlíkové stopy ostatních vrstev konstrukčních celků.

Poděkování

Tento článek vznikl za podpory projektu číslo FAST-J-20-6270 „Problematika dopravy prefabrikovaných dílců pro zelené střechy“.

Použité zdroje

- [1] HEJL, Martin, Martin MOHAPL a Lukáš BŘÍZA. Modular Green Roofs and their Usage in the World. *International Journal of Engineering Research in Africa Vol. 47*. Švýcarská konfederace, 2020, 6. ISSN 1663-3571.
- [2] ECOSEDUM®PACK [online]. Česká republika, 2020 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.ecosedum.cz/>
- [3] Metodika LCA. *Envimat.cz* [online]. Česká republika, 2020 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <http://envimat.cz/metodika/lca/>
- [4] Katalog materiálů (Ecoinvent). *Envimat.cz* [online]. Česká republika, 2020 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <http://envimat.cz/materialy/>
- [5] The International EPD® System. *Environdec.com* [online]. Sweden, 2020 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: [https://gryphon4.environdec.com/system/data/files/6/11300/S-P-00172%20EPD%20Terbond%20\(English%20version\).pdf](https://gryphon4.environdec.com/system/data/files/6/11300/S-P-00172%20EPD%20Terbond%20(English%20version).pdf)
- [6] Uhlíková stopa – přehledná tabulka. *Viessmann.cz* [online]. 2020 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/rady-a-tipy/uhlikova-stopa.html>
- [7] HALAMA, Miroslav. Uhlíková stopa ve stavebnictví a její teoretická hodnota. Brno, 2017. 92 s., 6 příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební ekonomiky a řízení. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Krejza, Ph.D.

SROVNÁNÍ DOBY VÝSTAVBY EXTENZIVNÍ ZELENÉ STŘECHY KONSTRUOVANÉ Z PŘEDPĚSTOVANÝCH PANELŮ A POMOCÍ KLASICKÉ KONSTRUKCE

COMPARISON OF THE CONSTRUCTION TIME OF THE EXTENSIVE GREEN ROOF CONSTRUCTED FROM PREFABRICATED PANELS AND CLASSICAL CONSTRUCTION

Martin Hejl¹

*Martin.Hejl@vutbr.cz

¹Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Institute of Technology, Mechanization and Construction Management, Veverí 331/95, 602 00, Brno-střed-Veverí, Czech Republic

Abstrakt

Jedním z hlavních problémů současných měst je nedostatečné zvládnání srážkových vod stejně jako přehřívání jejich center vlivem efektu městských tepelných ostrovů. Ke zlepšení těchto problémů může pomoci větší rozšíření zeleně ve městech. K tomuto rozšíření je možné přikročit pomocí častější konstrukce zelených střech. Jejich rozšíření však brání argumenty současných stavebních firem a mínění investorů, že se jedná o nákladné a dlouho trvající stavby, které nepřinášejí žádný dodatečný užitek. Tento článek se věnuje nejjednodušší možné konstrukci zelené střechy, kterou je extenzivní zelená střecha. V článku je ukázán příklad konstrukce zelené střechy na experimentální plošině a porovnání doby jeho konstrukce s konstrukcí zelené extenzivní střechy pomocí předpěstovaných panelů.

Klíčová slova

Zelené střechy, prefabrikace, realizace, doba realizace, extenzivní zelená střecha

Abstract

One of the main problem of today cities is insufficient management of rainwater as well as the overheating of the city center due to the effect of urban heat islands. One of the possible solutions is creating of more green spaces in the cities. We can provide a solution by construction of the green roofs. However, their expansion is hampered by the arguments of current construction companies and the opinion of investors about them. Investors think about green roofs that they are expensive and their construction takes a longer time than construction of classical roof. This article describes construction of an extensive roof and shows an example of using prefabricated panels for extensive roof. These types of green roofs will be compared in this article by the time consumption for their realization.

Key words

Green roofs, prefabrication, realization, realization time, extensive green roof

1 ÚVOD

Každým rokem je slyšet o neustálém oteplování planety Země, kdy je prokazatelně možné na základě vědeckých dat shromážděných americkou vesmírnou agenturou NASA dokázat průměrné celosvětové oteplení planety od roku 1880 o 0,98 °C. Největší nárůst teplot je možné pozorovat za posledních 35 let. V dlouhodobém měřítku je poté vidět, že posledních pět let bylo nejteplejších od roku 1880 [1]. V České republice je na datech shromážděných Českým hydrometeorologickým ústavem vidět ještě dramatičtější nárůst teplot, kdy od konce 19. století do roku 2010 došlo k nárůstu o 1,3 °C [2].

Toto oteplování našeho okolí má na nás přímý důsledek, z toho důvodu, že zároveň dochází k průměrnému nižšímu úhrnu srážek během kalendářního roku než v minulosti. Následkem nižších srážek dochází k odčerpávání

zásob podzemních vod, které nejsou dostatečně doplňovány a tím jen přispíváme ke stále zrychlující se spirále oteplování našeho okolí a vznikání tzv. tepelných ostrovů ve městech. [3]

Ze stavebního hlediska je tato problematika velmi rozsáhlá a možností, jak se v rámci stavebního průmyslu, především v rámci samotných konstrukcí, podílet na zpomalení nárstu teplot či jeho snížení je velmi omezené množství obzvláště při zachování současných stavebních trendů. Jednou z možností, která je aplikovatelná i na většinu stávajících staveb, je konstrukce zelených střech. Samotný přínos zelených střech s ohledem na jejich retenci, zpomalení odtoku srážkových vod do kanalizace, účinek rostlin při odstraňování polutantů ze vzduchu, ochranu stavebních konstrukcí či jejich příznivý vliv na teplotu v jejich okolí byl, již mnohokrát popsán. [4]

Samotná konstrukce zelených střech je ovšem pro laickou veřejnost velmi komplikovaná, časově náročná, a ne zřídka i nákladná. Z tohoto důvodu se vědecký tým Fakulty stavební VUT v Brně rozhodl zkonstruovat prototyp předpěstovaného panelu z ekonomicky dostupných a co nejméně ekologicky zatěžujících prvků. [5] Tento prototyp byl následně detailně popsán a v tomto článku bude porovnán s klasickou konstrukcí zelené střechy. Samotné konstrukce budou porovnány v laboratorních podmínkách na speciální střešní plošině zkonstruované pro tento účel. Porovnání bude provedeno na základě časové náročnosti pro sestavení ploché zelené střechy ve dvoučlenném pracovním týmu a dále bude změřena retence vody pro tyto dvě střešní konstrukce. V závěru článku je možno se dočíst, jaké jsou výhody každé ze zvolených variant a jak je možné případné problémy v následujícím výzkumu zlepšit či naprosto eliminovat.

2 KONSTRUKCE TESTOVACÍHO SEGMENTU A EXTENZIVNÍ ZELENÉ STŘECHY

Z důvodu nutnosti co možná nejvíce eliminovat nepříznivé povětrnostní podmínky, vliv nestejných půdorysných rozměrů, sklonu a skladby konstrukce či výšky, ve které by byla konstrukce prováděna bylo rozhodnuto netestovat tyto dvě skladby na reálných střechách. Proto byl na půdě výzkumného střediska ADMAS vytvořen dočasný testovací segment střechy pro testování odtokových parametrů střech. Testovací segment byl navržen, tak, aby na něm bylo možné následně měřit i jiné typy střech. Díky konstrukci, která umožňuje změnu sklonu testovacího segmentu s bezpečným sklonem až 40°, bude na této plošině možné měřit odtokové parametry i pro některé typy šikmých střech. Především tedy pro ty, které budou navrženy jako zelené střechy. Nosná konstrukce testovacího segmentu byla vytvořena pomocí dřevěných prvků. Především poté hranolů různých průměrů a latí.

Samotná plocha testovacího segmentu o rozměrech 4000 × 2360 mm byla vytvořena pomocí OSB desek, na které byl pro vytvoření vodotěsné vrstvy nataven oxidovaný asfaltový hydroizolační pás určený pro zelené střechy. Na spodní hraně testovacího segmentu byl zřízen odtok za použití klasického dešťového okapu. Z okapu byla poté voda odváděna pro testování daných skladeb do připravených jímacích nádob umístěných na digitální váze určené pro tyto účely. Z důvodu možnosti umístění různých skladebných variant plochých střech na testovací segment bylo rozhodnuto zkonstruovat čtveřici bočnic o výšce 350 mm. Hlavní bočnice u svodu byla řešena jako pevná a zbylá trojice bočnic byla řešena jako odnímatelná. Odnímatelné bočnice byly řešeny především z důvodu konstrukce plochých zelených střech, ale neméně podstatným důvodem byla i možnost revize střešního souvrství ze stran v případě využití na delším časovém úseku než ten, který byl využit pro testování problematiky v tomto článku. Na bočnicích a na hydroizolaci byla poté připevněna geotextilie 300 g/m². K zamezení porušení geotextilie či změny jejich vlastností byla geotextilie měněna vždy za novou po skončení testu jednoho typu konstrukce. Pro zamezení vlivu povětrnostních podmínek byla nad testovacím segmentem zřízena střecha pomocí zaplachtování nepropustnou fólií, tak aby, bylo zamezeno vlivu srážek či odvanutí vody pouštěné do testovacího segmentu. Samotnou konstrukci

Konstrukce experimentálního prototypu předpěstovaného panelu byla založena na zkušenostech vědeckého týmu zabývajících se touto problematikou a zároveň na konzultacích s odbornými pracovníky realizujícími ploché zelené střechy. Samotný experimentální panel byl následně upravován a vyvíjen po dobu 4 let, tak aby splňoval nároky kladené stavební praxí na bezpečnost a snadnou manipulovatelnost. Zároveň samozřejmě panel musel odpovídat standardům pro konstrukci zelených střech a udržovat dostatek živné půdy pro rostliny, které na něm byly vypěstovány. V rámci testování různých typů panelů bylo zjištěno, že příliš půdorysně malé panely byly v případě samostatného pěstování neschopné udržet dostatečnou vláhu a předpěstování by na nich tudíž ztrácelo smysl, neboť by musely být dotovány velkým objemem vody. Půdorysně větší panely naopak ztrácely schopnost jednoduché manipulace jedním či dvěma pracovníky. Větší z panelů ovšem ukázaly, že jsou schopné nést i semi-intenzivní až intenzivní vegetaci, ovšem jejich váha, především při plně nasyceném vzorku, byla příliš velká pro konstrukci vedenou jedním člověkem. Z těchto důvodů bylo přistoupeno ke konstrukci kombinující oba postupy, tedy půdorysně větší předpěstovaný panel s maximálním možným odlehčením za pomoci extenzivního typu zelené střechy. Panel samotný se tedy v poslední vývojové fázi skládal z nosné vrstvy vytvořené pomocí desky extrudovaného polystyrenu XPS o výšce 100 mm a půdorysných rozměrech 1200 x 600 mm. Na tomto panelu byla následně vytvořena hydroakumulační vrstva z retenčních desek vytvořených z recyklovaných

polyesterových vláken vzájemně spojených s vlákny tavitelnými bez použití chemických přísad. Zvolená výška retenčních desek byla 40 mm a půdorysné rozměry stejné jako u extrudovaného polystyrenu. Z udávaných technických parametrů je možno uvést plošnou hmotnost 4000 g/m² a maximální vodní kapacitu 29 l/m². Na retenční desce se poté nacházel substrátový vak tvořený obalovým materiálem z jutové sítě 211 g/m², ve kterém se nacházela pevná konstrukce z latí o rozměrech 48 × 24 mm kotvených skrz retenční desky do nosné vrstvy z extrudovaného polystyrenu a zároveň vytvářejících pevné okraje pro substrát. Pevné okraje bylo nutné zkonstruovat, aby nedocházelo, při přenášení či převozu k deformaci či výpadku substrátu z panelu. Výška substrátu v této konstrukci byla poté 60 mm. Substrát byl i na horní straně opatřen krytím z juty, jak je možno vidět na Obr. 1.

Sestavení střešní konstrukce z předpěstovaných panelů bylo realizováno za příznivých povětrnostních



Obr. 1 Extenzivní předpěstovaný panel pro zelené střechy.

podmínek za slunečného dne. Pro plochu testovacího segmentu bylo zkonstruováno devět experimentálních předpěstovaných panelů (obr.2). Na základě odborné diskuze bylo rozhodnuto panely neozelenovat. Neboť dostatečný pokryv panelů rozhodníky by trval příliš dlouhou dobu, která by se ovšem při komerční výrobě ve větším množství ztrácela kontinuální produkcí. V tomto bodě je potřeba vyzdvihnout především úvahu, že v případě ozelenění panelů by zásluhou použitých rostlin vzrostla absorpční (retenční) schopnost panelů a panely by byly zároveň kompaktnější. Za přítomnosti rostlin by tedy panely měly lepší technické vlastnosti, než měly ve skutečnosti. Devět panelů bylo tedy postupně přemístěno ze skladovací haly na testovací segment. Samotné sestavení střechy z předpěstovaných panelů dle časového měření zabralo 16 minut a 12 sekund, při realizaci dvěma pracovníky.

Skladba zelené střechy byla zvolena téměř stejná jako skladba experimentálního předpěstovaného panelu. Ke stejné skladbě bylo přistoupeno především z důvodu objektivního posouzení náročnosti konstrukce a jejich odtokových vlastností. Na vrstvu geotextilie byla tedy položena vrstva z retenčních desek o rozměru 1200 × 600 mm a výšce 40 mm. Na tu následně byl rozprostřen substrát v požadované výšce za pomoci vodících latí pro dodržení výšky 60 mm, které byly následně odebrány (obr. 3). Po odborné diskuzi byla po zkonstruování střecha z časových důvodů ponechána bez ozelenění. Ozelenění samo o sobě dodává střeše přidanou hodnotu v rámci retence a absorpce polutantů zároveň osázení střechy je časově náročné. Z toho důvodu by střecha

v případě ozelenění vykazovala lepší retenční schopnosti a zároveň by její konstrukce probíhala déle. Stavba klasické extenzivní zelené střechy trvala dvěma pracovníkům 60 minut.



Obr. 2 Konstrukce střechy z předpěstovaných panelů.



Obr. 3 Klasická extenzivní zelená střecha.

Srovnání obou typů konstrukce zelené střechy

Navrženým srovnáním obou střech je srovnání časové náročnosti a celkové náročnosti realizace stavby. Obě skladby byly realizovány na obdélníkové ploše 4000×2360 mm bez prostupů a bez úpravy krajů pomocí šterkového kačírku. Jednalo se tedy o čisté plochy extenzivních plochých zelených střech, které z časových důvodů nebyly osázeny rostlinami. Plocha takto provedeného střešního pláště byla tedy $9,44 \text{ m}^2$. Obě střešní skladby byly realizovány dvojicí pracovníků. Čas provedení byl následně upraven na standardní normohodinu pro jednoho pracovníka na jeden metr čtvereční. Zároveň bylo při realizaci uvažováno s nejhorší možnou variantou, a to

nutností vynést všechny materiály na střechu ručně. V tab. 1 je možno vidět dobu realizace střešní plochy za použití předpřestovaných panelů a v tab. 3 je vidět doba realizace pro variantu klasické extenzivní zelené střechy. V tabulkách 2 a 4 je poté možno porovnat dobu realizace jednotlivých dílčích konstrukčních částí obou zvolených skladeb.

Tab. 1 Doba výstavby zelené střechy z předpřestovaných panelů.

	Plocha (m ²)	Počet pracovníků:	Celková doba (min.)	Celková doba na 1 pracovníka	Doba na 1 m ² (min)
Plocha střechy:	9,44	2	16,2	32,4	3,43

Tab. 1 Doba položení jednotlivých částí zelené střechy z předpřestovaných panelů.

	čas (h)	čas (min)	čas na 1	Doba na 1 m ² (min)
Pokládka Geotextilie	0,1	6	12	1,27
Pokládka předpřestovaných panelů	0,17	10,2	20,4	2,16
			Celkem	3,43

Tab. 2 Doba výstavby extenzivní zelené střechy.

	Plocha (m ²)	Počet pracovníků:	Celková doba (min.)	Celková doba na 1 pracovníka	Doba na 1 m ² (min)
Plocha střechy:	9,44	2	60	120	12,71

Tab. 3 Doba dílčích procesů pro stavbu extenzivní zelené střechy

	čas (h)	čas (min)	čas na 1 pracovníka	Doba na 1 m ² (min)
Pokládka Geotextilie	0,1	6	12	1,27
Pokládka retenčních desek	0,3	18	36	3,81
Nošení + rozhrnutí substrátu	0,6	36	72	7,63
			Celkem	12,71

Z porovnání obou skladeb konstrukcí zelených střech na základě časové náročnosti na stavbě vyplynulo, že stavební realizace za pomoci předpřestovaných panelů je 3,7× rychlejší než v případě klasické extenzivní ploché zelené střechy.

3 ZÁVĚR

Na základě provedených testů je možné tvrdit, že zelená střecha za použití nového typu předpřestovaných panelů je výhodnější z hlediska časové náročnosti konstrukce zelené střechy na stavbě, kdy z naměřených dat vyšla rychlost konstrukce této střechy 3,7× rychlejší než klasická konstrukce zelené střechy. Když si tato čísla vztáhneme na reálnou střechu o 100 m² a zanedbáme vliv nutnosti opracovat okraje střechy a prostupy, které se v případě obou variant budou řešit stejnou metodou, dojdeme k době realizace střechy pomocí předpřestovaných panelů jedním pracovníkem za 5 hodin a 43 minut. V tomto případě by panely již byly plně ozeleněny. V případě klasické extenzivní střechy by tato střecha jednomu pracovníkovi zabrala 21 hodin a 11 minut bez instalace rozhodníkové pokrývky střechy, kdy v případě realizace za pomoci řízků můžeme mluvit o dodatečné době až 7 hodin. A v případě rozhrnutí rozhodníkových koberců přibližně 2 až 4 hodin v závislosti na členitosti půdorysu a počtu prostupů skrz střešní plášť. Je tedy možno vidět, že dojde k časové úspoře větší než 2 pracovní dny a střechu je schopen realizovat během jednoho dne plně ozeleněnou. V závislosti na čase dojde i k finanční úspoře odpovídající práci na střeše a mechanizaci nutné k dopravě materiálu na střechu po dobu 3 pracovních dnů.

V rámci konstrukce samotné střechy z předpřestovaných panelů či panelů samotných toho není mnoho co by se jim dalo vytknout. Ano, je možno se bavit o dalším jejich vývoji a nahrazení například konstrukce z latí za objemově menší plastové či kovové dílce, čímž by došlo ke zvýšení objemu substrátu na střeše a tím pádem

i k navýšení retenční kapacity. Nicméně cílem výzkumu je vytvořit plně ekologický panel, který po čase degraduje a vytvoří souvislou plochu zeleně bez narušení liniemi plastových či kovových okrajů, a tohoto cíle by nebylo za použití těchto materiálů jednoduché dosáhnout. Navýšení retenční schopnosti můžeme dosáhnout i například změnou hydroakumulačního materiálu, samotného substrátu či jinými způsoby, kterými se bude stále začínající vývoj předpěstovaných prvků dále zabývat v budoucnu.

Poděkování

Článek byl vytvořen v rámci řešení juniorského specifického výzkumu č. FAST-J-20-6270 „Transport problems of prefabricated components for the green roofs“ („Problematika dopravy prefabrikovaných dílců pro zelené střechy“)

Použité zdroje

- [1] NASA global climate change. NASA global climate change [online]. California Institute of Technology: California Institute of Technology, 2020 [cit. 2020-11-10].
- [2] Historická data meteorologie a klimatologie České republiky. Český hydrometeorologický ústav [online]. 2020 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/>
- [3] Heat Island effect. United States Environmental Protection Agency [online]. Environmental Protection Agency 1200 Pennsylvania Avenue, N.W. Washington, DC 20460: Environmental Protection Agency, 2019 [cit. 2019-09-05]. Available: <https://www.epa.gov/heat-islands>
- [4] Svaz zakládání a údržby zeleně. Svaz zakládání a údržby zeleně [online]. Brno: Svaz zakládání a údržby zeleně, 2014 [cit. 2017-11-30]. Dostupné z: <http://www.szuz.cz/cs/>
- [5] HEJL, M.; MOHAPL, M.; BŘÍZA, L. Modular Green Roofs and their Usage in the World. International Journal of Engineering Research in Africa, 2020, vol. 47, no. 1, p. 103-108. ISSN: 1663-3571.

PŘESUNY HMOT V SOUVISLOSTI S REALIZACÍ ZELENÝCH STŘECH

MATERIALS TRANSFERS IN CONNECTION WITH THE IMPLEMENTATION OF GREEN ROOFS

Jan Jílek^{*1}

*jan.jilek93@seznam.cz, 167046@vutbr.cz

¹Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, Brno, 602 00

Abstrakt

Článek analyzuje stavebně-technologické procesy při realizaci zelených střech. Ze tří základních typů zelených střech vyplývá rozdílná energetická a časová náročnost při vlastní realizaci. Článek se zaměřuje na přesun hmot pro extenzivní, semiintenzivní a intenzivní variantu ozeleněného zastřešení. Zmiňuje možnou manipulaci s materiálem a zefektivnění realizačních postupů.

Klíčová slova

Zelená střecha, přesuny hmot, extenzivní střecha, intenzivní střecha, semiintenzivní střecha

Abstract

The article analyzes the construction-technological processes in the implementation of green roofs. The three basic types of green roofs result in different energy and time requirements during the actual implementation. The article focuses on the transfer of materials for extensive, semi-intensive and intensive variants of green roofing. It mentions possible manipulation and streamlining of implementation procedures.

Key words

Green roof, materials transfers, extensive roof, intensive roof, semiintensive roof

1 ÚVOD

Tento článek je zejména zaměřen na studii přesunů hmot v závislosti na druhu zelené střechy. Téma zelených střech je na začátku 21. století považováno za ideální řešení plochých střech, neboť společnost klade vyšší důraz na energetickou nenáročnost stavebnictví a zároveň ve městech dbá na estetičnost a návrat k přírodě. Z těchto důvodů jsme se s kolegy rozhodli podrobněji se zaměřit na celkovou strukturu zelených střech, jednotlivé skladby různých typů zelených střech (extenzivní, intenzivní, semiintenzivní) a jejich časovou náročnost při samotné realizaci. Cílem je objasnit materiálové složení jednotlivých typů, zhodnotit a zefektivnit realizační postupy při implementaci zelených střech jako je např. zefektivnění přesunů hmot.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU ZELENÝCH STŘECH

V současnosti můžeme zelené střechy dle mocnosti vegetace rozdělit na extenzivní, semiintenzivní a intenzivní.

U extenzivní zelené střechy je tloušťka vegetační vrstvy poměrně nízká - 5 až 10 cm. Tyto typy střech působí na střešní konstrukce nižším zatížením a jsou tedy vhodné na většinu střech, aniž by docházelo k nebezpečí destabilizace nosné konstrukce. I přesto je u starších objektů, kde zelenou střechu realizujeme vhodné ověřit její únosnost pomocí statického výpočtu. V rámci vegetace osazujeme do substrátu suchomilnější rostliny (byliny, suchomilné trávy, rozchodníky, aj.), které si vystačí s malou tloušťkou zeminy a menším množstvím vody. Střechy plní zejména okrasný a tepelně izolační účel a nejsou vhodné jako pochozí střechy. Údržba těchto střech je nenáročná. V případě záměru používat střechu k pohybu osob, volíme spíše semiintenzivní nebo intenzivní zelené střechy.

Intenzivní střechy se realizují na střešních konstrukcích, které snesou vyšší zatížení, neboť tloušťka substrátu se zde může pohybovat v tloušťkách od 30 do 100 cm a v ojedinělých případech i výše. Celý tento systém díky tloušťce substrátu účinně dokáže zadržovat velké množství dešťové a závlahové vody. Intenzivní střechy se používají zejména jako odpočinkové prostory teras a dalších venkovních prostor. Vegetací zde mimo nižší

zatravnění můžou být i různé druhy nižších keřů, dřevin a případně menší stromky. Tento typ střechy také vyžaduje stálou údržbu a dohled.

Semiintenzivní zelená střecha je kombinací dvou výše uvedených typů střech.

Střešní souvrství zelených střech

Funkční vrstva *	Funkce
Vegetace	je souborem rostlin, který tvoří pokryv zelené střechy
Vegetační vrstva	je základním prostředím pro kořenění a růst rostlin a svým fyzikálním, chemickým a biologickým složením a vlastnostmi je k tomu uzpůsobena
Filtrační vrstva	zabraňuje vyplavování drobných částic z vegetační vrstvy do vrstvy drenážní a trvale chrání drenážní vrstvu před zanesením
Hydroakumulační vrstva**	akumuluje srážkovou nebo závlahovou vodu pro potřeby rostlin
Drenážní vrstva	umožňuje dostatečně rychlý a efektivní odtok přebytečné vody k odvodňovacím zařízením
Ochranná vrstva	trvale chrání hydroizolaci střechy před mechanickým poškozením
Separální vrstva**	navzájem od sebe odděluje sousední materiály nebo prvky, které by se mohly vzájemně negativně ovlivňovat
Kořenovzdorná vrstva***	ochranná vrstva proti prorůstání kořenů, chrání hydroizolaci střechy před poškozením kořeny rostlin

Obr. 1 Funkční vrstvy vegetačního souvrství (převzato z [1]).

* Vícefunkční (polyfunkční) vrstva plní více funkcí současně (např. nopová fólie plní funkci drenážní i hydroakumulační).

** Nemusí být součástí vegetačního souvrství, používá se v opodstatněných případech.

*** Samostatná ochranná vrstva proti prorůstání kořenů rostlin se používá spíše výjimečně, a to v případech, kdy stávající hydroizolace střechy není odolná proti prorůstání. Stává se to převážně u vegetačních souvrství zřizovaných na stávajících střechách s původní hydroizolací. U nově zřizovaných zelených střech nebo u rekonstrukcí, na kterých se předpokládá zřízení vegetačního souvrství, se dnes již používají hydroizolační výrobky (asfaltové pásy i fólie) s potřebnou odolností proti prorůstání kořenů rostlin a příslušným atestem.

		Mocnost souvrství využitelná pro kořenění rostlin v cm																							
		4	6	8	10	12	15	18	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	125	150	200		
Způsoby ozelenění a formy vegetace	Extenzivní zelené střechy	Rozchodníky	■	■	■																				
		Rozchodníky - trvalky		■	■	■	■																		
		Rozchodníky - byliny - trávy				■	■	■	■	■															
		Trávy - byliny							■	■	■	■	■	■	■	■									
	Polointenzivní zelené střechy	Trávy - byliny						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
		Trvalky									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
		Keře																				■	■	■	
		Malé a střední stromy																					■	■	
	Intenzivní zelené střechy	Trávník																							
		Trvalky																							
Keře																									
Malé a střední stromy																									
Vysoké stromy																									

Obr. 2 Mocnost souvrství využitelná pro jednotlivé druhy vegetace (převzato z [1]).

Obrázek níže popisuje poměrové složení jednotlivých vrstev v jednotlivých typech zelené střechy.

Jednovrstvé extenzivní souvrství	Extenzivní souvrství	Polointenzivní souvrství	Intenzivní souvrství
extenzivní vegetace	extenzivní vegetace	polointenzivní vegetace	intenzivní vegetace
vegetační vrstva s velmi zvýšenou vodopropustností	vegetační vrstva lehká	vegetační vrstva těžká	vegetační vrstva tvořena z 1/3 z těžké a ze 2/3 z lehké části, spodní část může být doplněna o hydroakumulační vrstvu s definovanou nasákovostí a vodopropustností
	filtrační vrstva		
	drenážní vrstva		
ochranná a separační vrstva			
hydroizolace odolná proti prorůstání kořenů			

Obr. 3 Poměrové složení vrstev v jednotlivých druzích zelených střech (převzato z [1]).

3 METODIKA

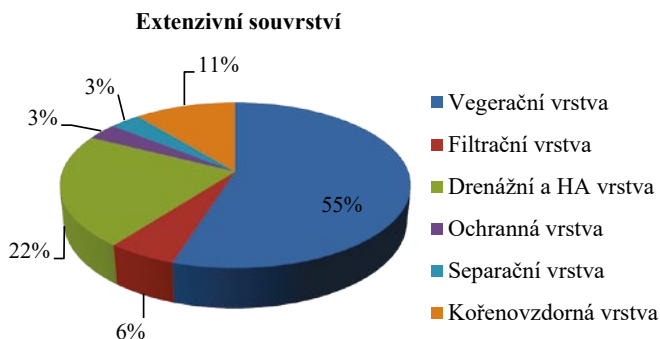
V jednotlivých typech zelených střech jsme porovnali procentuální zastoupení jednotlivých vrstev, abychom mohli lépe optimalizovat proces realizace jednotlivých typů střechy.

Dalším krokem bylo určit, dle jakých kritérií hodnotí RTS software svislé přesuny hmot. Proto byl vytvořen cvičný rozpočet s určením jednotlivých typů budov a přesuny rozříděny dle výšek přemísťování, což je pro realizace střech klíčové.

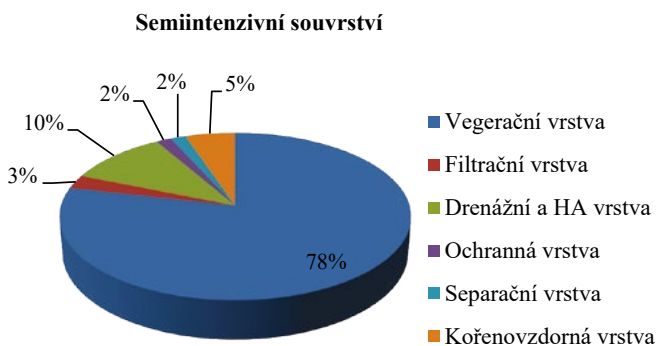
Jako poslední byl detailně popsán přepravní box na zelený koberec, který slouží k dopravování funkčních vrstev na střešní konstrukci.

4 VÝSLEDKY

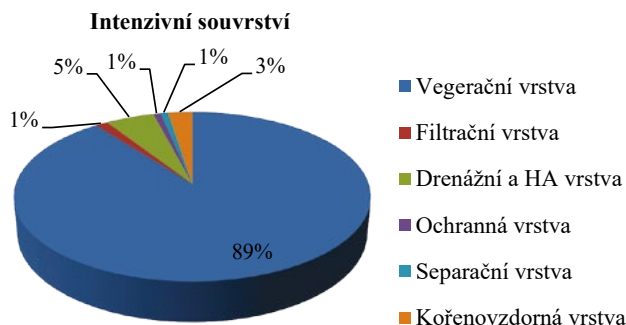
Při analyzování jednotlivých typů zelených střech, ze kterých vyplývají níže uvedené výšečové grafy, jsme zjistili, že u extenzivních zelených střech tvoří substrát pro vegetaci 55% z objemu, který je na 1 m² střechy, u semiintenzivních střech se jedná o 78% a u intenzivních zelených střech to bylo celých 89% z objemu (u extrémních tloušťek substrátu se může hodnota přímo úměrně k tloušťce zvyšovat). U výsledků jsme záměrně vynechali tloušťku vegetace, neboť ta je pro nás z hlediska realizace zanedbatelná.



Obr. 4 Procentuální vyjádření objemu vrstev u extenzivní zelené střechy (autor).



Obr. 5 Procentuální vyjádření objemu vrstev u semiintenzivní zelené střechy (autor).



Obr. 6 Procentuální vyjádření objemu vrstev u intenzivní zelené střechy (autor).

Tab. 1 Tabulka tloušťek vrstev jednotlivých druhů zelených střech (autor).

Funkční vrstva	Extenzivní souvrství		Semiintenzivní souvrství		Intenzivní souvrství	
	Tloušťka [mm]	Tíha [kg/m ²]	Tloušťka [mm]	Tíha [kg/m ²]	Tloušťka [mm]	Tíha [kg/m ²]
Vegetace	-	-	-	-	-	-
Vegerační vrstva	50	75	150	225	350	525
Filtrační vrstva	5	0,50	5	0,50	5	0,50
Drenážní a HA vrstva	20	0,95	20	0,95	20	0,95
Ochranná vrstva	3	0,35	3	0,35	3	0,35
Separáčnı vrstva	3	0,30	3	0,30	3	0,30
Kořenovzdorná vrstva	10	1,20	10	1,20	10	1,20

Systém RTS rozpoznává při určování svislých přesunů hmot různé konstrukční typy budov a u nich různé hodnoty výšek. Podrobná tabulka níže popisuje, jaké kombinace lze v softwaru navolit.

Tab. 2 Tabulka přesunů hmot pro zděné budovy (autor).

Typ přesunu hmot	Cena/MJ
Přesun hmot pro budovy zděné výšky do 6m	337,50 Kč
Přesun hmot pro budovy zděné výšky do 12m	291,50 Kč
Přesun hmot pro budovy zděné výšky do 24m	297,50 Kč
Přesun hmot pro budovy zděné výšky do 36m	529,00 Kč
Přesun hmot pro budovy zděné výšky do 45m	559,00 Kč
Přesun hmot pro budovy zděné výšky do 52m	599,00 Kč

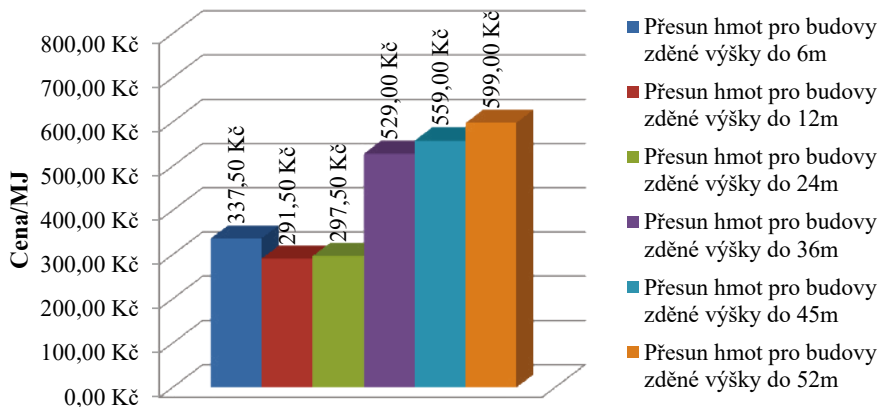
Tab. 3 Tabulka přesunů hmot pro budovy z bloků (autor).

Typ přesunu hmot	Cena/MJ
Přesun hmot pro budovy z bloků výšky do 6m	285,00 Kč
Přesun hmot pro budovy z bloků výšky do 6m	241,00 Kč
Přesun hmot pro budovy z bloků výšky do 6m	255,50 Kč
Přesun hmot pro budovy z bloků výšky do 6m	487,00 Kč
Přesun hmot pro budovy z bloků výšky do 6m	525,00 Kč

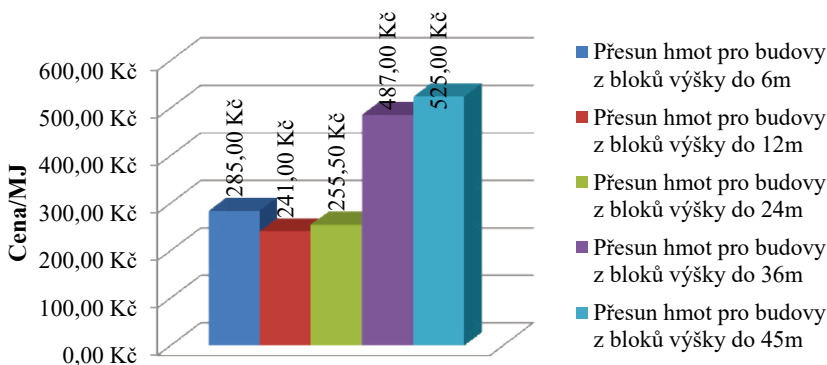
Tab. 4 Tabulka přesunů hmot pro budovy monolitické (autor).

Typ přesunu hmot	Cena/MJ
Přesun hmot pro budovy monolitické výšky do 6m	515,00 Kč
Přesun hmot pro budovy monolitické výšky do 12m	365,50 Kč
Přesun hmot pro budovy monolitické výšky do 24m	453,50 Kč
Přesun hmot pro budovy monolitické výšky do 36m	609,00 Kč
Přesun hmot pro budovy monolitické výšky do 48m	691,00 Kč
Přesun hmot pro budovy monolitické výšky do 52m	691,00 Kč
Přesun hmot pro budovy monolitické výšky do 64m	803,00 Kč
Přesun hmot pro budovy monolitické výšky do 76m	877,00 Kč
Přesun hmot pro budovy monolitické výšky do 88m	951,00 Kč
Přesun hmot pro budovy monolitické výšky do 100m	1 070,00 Kč

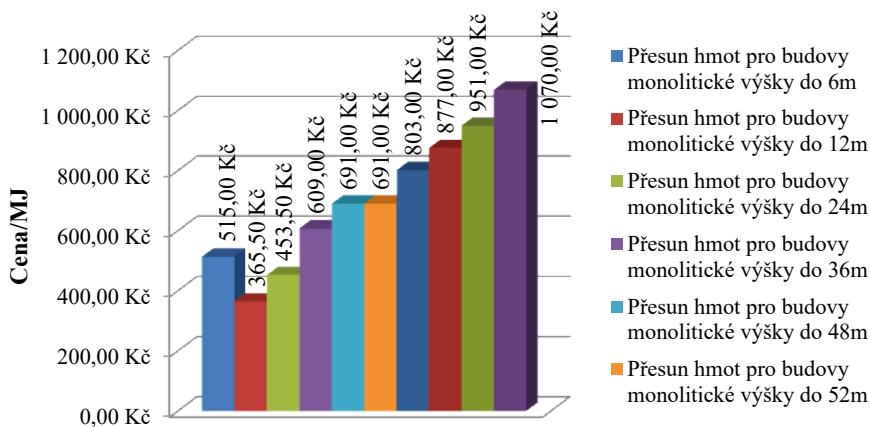
Do níže uvedených obrázků byla graficky vyznačena závislost výšky přesunu a ceny za měrnou jednotku pro různé druhy budov. Grafy uvádí, že nejnižší výška přesunů je u všech typů budov vždy ekonomicky náročnější než druhý nejnižší, přičemž následná výška je z hlediska nákladů na nižší úrovni a dále ceny za postupně vyšší výšky stoupají.



Obr. 7 Vyjádření závislosti ceny na výšce přesunu u zděných budov (autor).



Obr. 8 Vyjádření závislosti ceny na výšce přesunu u budov z bloků (autor).



Obr. 9 Vyjádření závislosti ceny na výšce přesunu u monolitických budov (autor).

Manipulační box pro přepravu travních koberců

Současný trend na ozeleňování střech a teras vyžaduje vývoj a výzkum možného zefektivnění tohoto stavebního procesu. V současné době je tato technologická etapa značně pomalá a obsahuje vysoké procento ruční práce. Pro potřeby vertikální a horizontální přepravy vegetačního materiálu byl navržen přepravní box pro travní koberce. Travní koberce mají specifické vlastnosti. Jedná se biologický materiál, který je potřeba zpracovat a stavební konstrukce (střechy) rychle a bez poškození. Travní koberce jsou v primární dopravě tj. z místa předpěstění na staveniště přepravovány na dřevěných paletách. Plně naložené dřevěné palety tvoří velké místní zatížení a hrozí statické poškození vlastní konstrukce a také vzniká riziko poškození spodních hydroizolačních a drenážních vrstev.

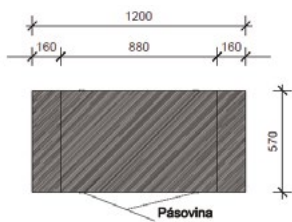
Přeprava po staveništi tj. přeprava sekundární není dostatečně mechanizována a většinou je řešena s velkým podílem manuální práce. Přepravní box umožňuje rychlou a efektivní přepravu pěti rolí travních koberců. Role s travními koberci jsou v přepravním boxu bezpečně uloženy a je možný transport na místo určení stavebním jeřábem.

Technický popis:

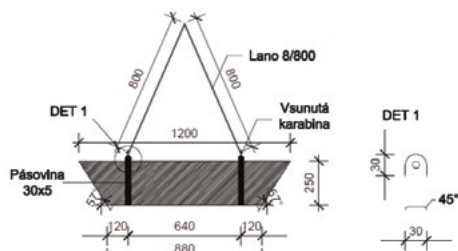
Jedná se o přepravní box z vodovzdorné překližky tloušťky 18 mm. Z hlediska stability travních koberců v přepravním boxu byl navržen symetrický konický tvar s podstavou 800×570 mm. Horní rozměr je 1200×570 mm. Hloubka boxu je 250 mm.

Přepravní box je zvedán na čtyřech fixních bodech. Fixní body jsou konce ocelové pásoviny průřezu 30×5 mm. Pásovina je provlečena pod dnem boxu. Osová pozice pásoviny je 120 mm od obou konců podstavu. Na fixní body se uchycují 4 karabiny a 4 úvazy z polyesterového lana průměru 8 mm.

Tvar byl navržen dle skutečných formátů rolí z travních koberců. Do přepravního boxu se na dno vejdu 3 role a do druhé vrstvy je možné umístit další dvě role. Běžně používaná role travního koberce je váleček průměru 350 mm a délky 400 mm.



Obr. 11 Půdorys přepravního boxu (autor).



Obr. 10 Boční pohled přepravního boxu (autor).



Obr. 12 Přepravní box (autor).

5 ZÁVĚR

Článek se zabýval průzkumem zelených střech. Konkrétně procentuálním zastoupením jednotlivých vegetačních vrstev. Kdybychom měli porovnat hmotnostní a objemové zastoupení jednotlivých vrstev, tak u hmotnostního porovnání by vrstva substrátu všech tří typů zelených střech byla nad 95% celkové hmotnosti na 1 m².

U dat přesunů hmot ze systému RTS se hodnoty dělily dle typu budovy na zděné, monolitické a budovy z bloků. U všech tří typů byl přesun hmot na nejnižší úrovni vždy ekonomicky náročnější než u druhé následné výšky a další ceny pak přímo úměrně rostly s rostoucí výškou přesunu. V poslední fázi byl popsán přepravní box na zelený koberec, který má za úkol přemístění vegetační vrstvy zeleného koberce, aniž by došlo k jeho porušení.

Poděkování

Tento článek vzniknul za podpory specifického projektu FAST-J-20-6270 Problematika dopravy prefabrikovaných dílců pro zelené střechy.

Použité zdroje

- [1] ŠIMEČKOVÁ J., Svaz zakládání a údržby zeleně z.s. 9/2016, *Zelené střechy - Naděje pro budoucnost II.*, Brno 2016, p. 4-8. [cit. 18. listopadu 2020]
- [2] ECOSEDUM PACK [online]. Paskov. Dostupné na <https://www.ecosedum.cz/ecosedum-pack/jaky-je-rozdil-mez-extenzivni-a-intenzivni-zelenou-strechou/> [necitováno]
- [3] EKODOTACE BRNO [online]. Brno. Dostupné na <https://ekodotace.brno.cz/wp-content/uploads/2019/05/Odborn%C3%A1-metodika-zelen%C3%A9-st%C5%99echy.pdf> [necitováno]
- [4] COLEMANSI [online]. Vsetín. Dostupné na <http://www.coleman.cz/skladba-zelene-strechy/> [necitováno]
- [5] DEK [online]. Dostupné na <https://www.dek.cz/obsah/technicka-podpora/vegetacni-strechy> [necitováno]
- [6] POČÍTÁME S VODOU [online]. Dostupné na <https://www.pocitamesvodou.cz/zelene-strechy/> [necitováno]

LEPIDLA VE STAVEBNICTVÍ

ADHESIVE IN CONSTRUCTION

Aleš Průcha^{*,1}

*Ales.Prucha@vut.cz

²Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Tento článek se zabývá lepidly. Popisuje historii využívání lepidel od minulosti až do rozmachu lepidel ve 20.století. Článek ukazuje rozdělení lepidel z fyzikálního a chemického hlediska. Dále se zabývá použitím a testováním konstrukčních lepidel v oblasti stavebnictví. V poslední kapitole článek popisuje rešerši již proběhlých výzkumů.

Klíčová slova

Lepidlo, lepení, zkoušky, podklad, struktura

Abstract

This article deals with building adhesives. It describes historical context of the use of adhesives from very past to the 20th century. The article shows the distribution of adhesives from physical and chemical point of view. It also focuses on using and testing of construction adhesives. The last chapter of this article shows the search around field.

Key words

Adhesive, bonding, test, foundation, structure

1 ÚVOD

Cílem tohoto článku je obsažení základních faktů a poznatků o lepidlech ve stavebnictví. Článek popisuje historii lepidel od minulosti po současnost. Dále se v článku pojednává o aktuální nabídce lepidel, jejich rozdělení a základní charakteristiky. Také je v článku obsažena problematika podkladů, jejichž charakteristika je velmi důležitá pro použití lepidel. Závěrem článku jsou uvedeny budoucí zkoušky lepidel, které budou zásadní pro mou dizertační práci a kterými se budu zabývat z praktického hlediska.

2 HISTORIE

Jak uvádí Herrmann, historie lepidel se dá datovat již 200 000 let do minulosti, kdy člověk poprvé použil technologii lepení. Dle něho lze lepidlo definovat jako látku, která při interakci mezi dvěma povrchy způsobí slepení. Prvními pokusy o slepení lze přisoudit lidem při pokusech o slepení kamenných hlav šipek na dřík pomocí kůry, břízy a dehtu. 80 000 let př. n. l. byly lepidla a tmely ve formě přírodních materiálů byly používány na příblytky a dekorační výrobky doložené archeologickými vykopávkami. První velkovýroba spolu s první továrnou je datována do roku 1700 v Holandsku, kde bylo vyráběno lepidlo ze zvířat. V roce 1750 byl udělen první patent na výrobu tzv. rybích lepidel a další patenty na lepidla z přírodní gumy, zvířecích kostí a kaseinu přicházela v rychlém sledu.

Ve 20.století se začínají objevovat lepidla na bázi polymerů, za které byla udělena Nobelova cena za chemii v roce 1953 Herrmannu Staudingerovi. První tepelně rezistentní polyimidová lepidla byla vynalezena v USA v roce 1967. Pro mou práci důležitá polyuretanová lepidla začala vznikat od roku 1937 a jsou rozvíjeny do současnosti [1].

3 LEPIDLA SOUČASNOSTI

Základním rozdělením lepidel je na syntetická a na přírodní bázi. Dále se lepidla dělí do dvou kategorií – fyzikálně tuhnoucí a chemicky reagující. Fyzikálně tuhnoucí lepidla se nadále dělí na rozpouštědlová lepidla na bázi kaučuku, rozpouštědlová lepidla na bázi polymerů a disperzní lepidla (emulze na bázi kaučuků či disperzní lepidla na bázi polymerů. Chemicky reagující lepidla jsou jednosložková a dvousložková [2].

Existují tři základní technologicko-materiálové báze:

- Epoxidy
- Silikony
- Akryláty
- Polyuretany
- Silanem modifikované polymery [3]

V dizertační práci budou využívány zejména polyuretanová konstrukční jednosložková lepidla.

4 POSTUP LEPENÍ PŘI POUŽITÍ POLYURETANOVÝCH LEPIDEL

Podklad pro lepení bude u mé dizertační práce velmi různorodý vzhledem k typu lepených komponentů na vnější plášť budovy. Všeobecné požadavky pro kvalitní aplikaci lepidla jsou především dobře připravený podklad pro lepení a správné nanášení lepidel.

Příprava podkladu

Podklad musí být čistý, suchý a homogenní, zbavený všech nedostatečně držících částic. Při podkladu z betonu nebo betonové stěrky musí být podklad přebroušen a následně vysát. Při použití na fasádách je nutné použití penetračního nátěru pro scelení podkladu a zajištění kvalitní soudržnosti [4].

Způsob aplikace

Aplikace lepidla bývá často prováděna ve dvou vrstvách. První pro kvalitní nanesení na podklad a uhlazena pomocí rovné strany hladítka je nechána dle technického listu výrobce Sika 12-24 hodin pro první vytvrzení. Druhá vrstva bývá nanášena v silnější vrstvě pomocí zubové stěrky, kde je nutné umístění lepeného předmětu do 45 minut. Doba mezi nanesením první a druhé vrstvy nesmí být překročena, jinak je nutné její odstranění a opětovné nanesení [4].

Omezení

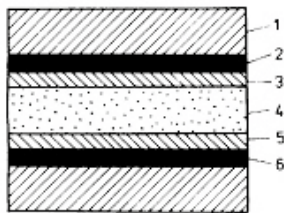
Teplotní omezení uvádí každý výrobce lehce jiný. U výrobce DINITROL bývá teplotné rozmezí od +5 °C do max. +35 °C, u výrobce Sika bývá minimální teplota +15 °. Ovšem přesná teplota musí být dodržena přesně dle jednotlivých technických listů daných lepidel, která pro potřeby dizertační práce budou přesně specifikována [4].

Doba plného vytvrzení

U SikaBond T-8 výrobce uvádí ~ 4 mm/24 hodin (+23 °C / 50 % r.v.), u DINITROL 500 výrobce uvádí 3,5–4 mm/24 hodin [4].

5 STRUKTURA A PEVNOST LEPENÝCH SPOJŮ

Každý spoj lze považovat za komplex tří hlavních vrstev a dvou mikrovrstev.



Obr. 1 Struktura lepeného spoje [2]; 1 – základní materiál, 2 – adhezní zóna, 3 – přechodová adhezní zóna, 4 – kohezní zóna, 5 – přechodová kohezní zóna, 6 – adhezní zóna.

Pevnost lepených spojů závisí na kvalitě lepeného spoje zejména na mechanických vlastnostech, a proto bude v dizertační zkoumána hlavně smyková pevnost spoje v tahu a doplňková pevnost v odlupování [2].

Smyková pevnost v tahu je dána vztahem

$$Tp = \frac{F_{max}}{A} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

$$A = b \times l \quad (2)$$

kde b je šířka spoje a l je délka přehlátovaného spoje.

Pevnost v odlupování je dána vztahem

$$\delta_{wa} = \frac{F_A}{b} \text{ (N. mm}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

tato pevnost se dělí na (absolutní) pevnost δ_{wa} a střední pevnost δ_{ws}

$$\delta_{ws} = \frac{F_S}{b} \text{ (N. mm}^{-1}\text{)} \quad (4)$$

kde F_A je maximální síla, F_S je průměrná síla, b je šířka lepeného spoje [2].

6 REŠERŠE

V následující kapitole je uvedena stručná rešerše vědeckých příspěvků, které byly získány z univerzitního přístupu do databáze vědeckých příspěvků Scopus. Rešerše se skládá z nejnovějších publikovaných článků v databázi z roku 2018 do 2020.

- Silvestru, V.A., Enghardt O., Schneider J. 2018 [5]

Článek sleduje trend u průhledných fasád, kde lze pozorovat častější použití lepených spojů místo mechanických. V tomto článku jsou diskutovány experimentální a numerické výsledky získané pro lineární strukturální silikonové spoje mezi substráty ze skla a nerezové oceli, zkoumané samostatně při tahovém a smykovém zatížení. Studie hlavně dvě vybraná lepidla, Dow Corning® 993 a Sikasil® SG-550, která jsou schválena pro zasklívací systémy pro konstrukční tmely a plánuje se jejich použití v rámci nové koncepce pro fasádní prvky s kompozitním strukturálním chováním, skládající se ze skleněné tabule a filigránového kovu rámování.

- Vlad Alexandru Silvestrua, Georg Kolanya, Bernhard Freytagb, Jens Schneiderc, Oliver Enghardt, 2019 [6]

Článek popisuje možnosti zvýšení konstrukční účinnosti spoje pro rámové prvky a sklenění tabule. Představuje nové konfigurace skleněných a kovových prvků spolu s výsledky zkoušek představených konfigurací. Článek dále představuje numerické modely pro predikci mechanické odezvy zkoumaných prvků sklo-kov a porovnání diagramů zatížení vs. posunutí.

- M. Drass, P. A. Du Bois, J. Schneider, S. Kolling, 2020 [7]

Studie popsaná v tomto článku se zabývá strukturním chováním adhezivních vazeb skla a kovu pomocí tenkých strukturálních silikonů v silně omezených aplikacích. Popisuje možnosti poruch při popsáném spojení a jejich úvaha při návrhu spojů sklo-kov.

- K.V. Machalicka, M. Voka, P. Pokorný, M. Pavlíkova, 2020 [8]

V tomto článku je popsána aplikace lepení ve stavebnictví se zaměřením na životnost a stárnutí prostředí. Řeší zásadní otázku pro bezpečný design. Příspěvek porovnává účinky tří různých postupů stárnutí (ponoření do teplé vody podle ETAG 002, zkouška neutrálním solným postříkem podle ISO 9142, postup E4 a rozšířený kataplazmový test založený na ISO 9142, postup E2) mezi sebou na lepidla, která jsou použitelná v oblasti stavebnictví.

- K.V. Machalicka, M. Voka, P. Pokorný, M. Pavlíkova, 2020 [9]

Zde se autoři zabývají účinky vystavení vlhkým podmínkám v rozšířené zkoušce stárnutí kataplazmy, založené na ISO 9142, postup E2 o mechanických vlastnostech lepených spojů. Účinky byly zkoumány jako součást komplexní studie stárnutí akrylátového lepidla a silana- ukončené polymerní lepidlo (STP). Je zde popsán přesný postup nanášení lepidel, příprava podkladů a následné pozorování účinků stárnutí spojů.

7 ZÁVĚR

Tento článek přehledně popsal základní teorii stavebních lepidel, která budou základním prvkem pro vypracování mé dizertační práce. V kapitole o historii lepidel byl objasněn vývoj lepidel od minulosti po 20. století. V další části bylo popsáno rozdělení lepidel současnosti dle jejich dvou hlavních kategorií, která jsou pro účely stavebnictví velmi důležitá a ukazují fyzikální a chemické vlastnosti jednotlivých lepidel.

Použité zdroje

- [1] HERRMANN, Onusseit. History of bonding and adhesives | adhesives and sealants. Adhesive Technology - Basic Principles. 2012, , 1-6. Publication ref.: FMI-EX-F04-012.
- [2] GREGOR, Miroslav. Technologie a technika lepení. In: Lepidla.cz [online]. [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/cs/a/technologie-a-technika-lepeni--zakladni-informace.html>
- [3] KANTOVÁ, Radka. Silanem modifikované polymery. In: Sborník anotací konference Juniorstav 2013. Brno, 2013. ISBN 978-80-214-4669-4.
- [4] Technické listy a materiály firem Sika CZ, s.r.o. a DINOL GMBH
- [5] SILVESTRU, Vlad Alexandru, Oliver ENGLHARDT a Jens SCHNEIDER. Investigations on linear silicone joints for glass-metal elements with composite structural behavior. Challenging Glass 6: Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, CGC 2018. 2018, 6(150017), 389-398. ISSN 978-946366044-0. Dostupné z: doi:10.7480/cgc.6.2162
- [6] SILVESTRU, Vlad Alexandru, Georg KOLANY, Bernhard FREYTAG, Jens SCHNEIDER a Oliver ENGLHARDT. Adhesively bonded glass-metal façade elements with composite structural behaviour under in-plane and out-of-plane loading. Engineering Structures. 2019, 200. ISSN 01410296. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2019.109692
- [7] DRASS, M., P. A. Du BOIS, J. SCHNEIDER a S. KOLLING. Pseudo-elastic cavitation model: part I—finite element analyses on thin silicone adhesives in façades. 2020, 5(1), 41-65. ISSN 2363-5142. Dostupné z: doi:10.1007/s40940-019-00115-4
- [8] MACHALICKÁ, K. V., M. VOKÁČ, P. POKORNÝ a M. PAVLÍKOVÁ. Effect of various artificial ageing procedures on adhesive joints for civil engineering applications. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2020, 97. ISSN 01437496. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijadhadh.2019.102476
- [9] MACHALICKÁ, K. V., M. VOKÁČ, M. KOSTELECKÁ a M. ELIÁŠOVÁ. Durability of structural adhesive joints for facade applications exposed to the extended kataplasm test. The Journal of Adhesion. 2019, 95(5-7), 632-652. ISSN 0021-8464. Dostupné z: doi:10.1080/00218464.2019.1570157

POROVNÁNÍ SOUDRŽNOSTI A PŘILNAVOSTI TMELU A SKLOCEMENTU PO VYSTAVENÍ ÚČINKŮM VODY

COMPARISON OF COHESION AND ADHESION OF SEALANT AND GLASS-CEMENT AFTER EXPOSURE TO EFFECTS OF WATER

Adam Boháček^{*1}, Michal Brandtner²

^{*}bohacek.a@fce.vutbr.cz

^{1,2}Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Problematika tmelení materiálů je ve stavebnictví velmi rozšířená. Výzkum shrnutý v tomto článku se zabývá tmelením sklocementového podkladu, který vykazuje vysokou problémovost. Tato problémovost je způsobena přítomností prachových částic, které zabraňují správnému přilnutí tmelu k podkladu. Cílem tohoto výzkumu je porovnání soudržnosti a přilnavosti tmeleného spoje a podkladu za použití vhodného primeru. Při zkoušení je postupováno podle platné české normy ČSN EN ISO 10590. Hlavním zjištěním vyplývajícím z tohoto výzkumu je, že ani jeden z vybraných tmelů neprošel zkouškou z důvodu porušení tmeleného spoje. Ani jeden z testovaných tmelů tedy nelze doporučit jako vhodný ke tmelení sklocementu.

Klíčová slova

Tmel, sklocement, tmelený spoj, přilnavost, soudržnost

Abstract

The issue of sealing materials is very widespread in construction. The research summarized in this article deals with the sealing of glass-cement substrates, which shows high difficulty. This problem is caused by the presence of dust particles, which prevent the sealant from adhering properly to the substrate. The aim of this research is to compare the cohesion and adhesion of the sealed joint and the substrate using a suitable primer. The testing is performed according to the valid Czech standard ČSN EN ISO 10590. The main finding resulting from this research is that none of the selected sealants passed the test due to failure of the sealed joint. Therefore, none of the tested sealants can be recommended as suitable for sealing glass-cement.

Key words

Sealant, glass-cement, sealant join, adhesion, cohesion

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Problém, jak ve stavebnictví spojit jednotlivé materiály, provází lidstvo prakticky od jeho civilizovaných počátků, a i dnes naše společnost potká tmelené spoje takřka na každém kroku. Do začátku 20. století byly však veškeré materiály používané pro tmelení pouze přírodního charakteru. Postupem času se ale díky rozvoji technologií a chemického průmyslu přesunuly materiály používané pro tmelení do oblasti složitých chemických sloučenin. I díky tomuto došlo v posledních dvou desetiletích k obrovskému pokroku v technologii a aplikaci stavebních tmelů [1].

Hlavním účelem tmelu je zabránit vzduchu, vodě a dalším látkám před vstupem do konstrukce nebo před jejím opuštěním a umožnění určitého rozsahu pohybu podkladů. Tmely zabudované do spár budov dále zajišťují tepelnou a zvukovou izolaci a často přispívají k požární odolnosti konstrukce [2]. Spoje a otvory mezi konstrukčními prvky lze nalézt v mnoha různých částech budov nebo stavebních konstrukcí, například mezi prefabrikovanými betonovými prvky ve fasádách, kolem oken a dveří, ve spojení mezi podlahami a stěnami atd. Ačkoli se spoje nachází v mnoha oblastech stavby je zjevné, že mezi nimi panují značné rozdíly [2,3]. Nejen z těchto důvodů musí být tmelené spoje vždy navrženy tak, aby odolaly všem vnitřním i vnějším vlivům, mezi ty, jež tmelené spoje nejvíce zatěžují pak patří vlivy klimatické [3].

Pakliže předpokládáme, že tmelený spoj bude těmto vlivům vystaven je vhodné vybírat tmel, který je proti těmto podmínkám rezistentní. Ale vzhledem k nepřehlednému množství výrobků na českém trhu a k tomu, že ne vždy doporučení výrobce odpovídá skutečné odolnosti tmelu proti těmto vlivům, vybrat takový tmel není vůbec nic snadného. Cílem této práce je proto porovnání kvality tmelů právě po vystavení klimatickým vlivům a jejich pozdější soudržnosti s podkladním materiálem, a to pomocí vhodných, normou schválených zkušebních postupů.

2 MATERIÁL

Pro potřeby tohoto výzkumu je třeba vybrat podkladní materiál, tmely výrobcem doporučené pro tmelení vybraného podkladního materiálu a dále vhodný prumer.

Pro výběr podkladního materiálu užitého v tomto výzkumu je rozhodující problémovost materiálu při řešení tmelených spojů, dále pak jeho dostupnost na českém trhu. Díky těmto kritériím je jako podkladní materiál vybrán sklocement. Tento materiál se vyznačuje vysokou mírou prachových částic na svém povrchu, které značně narušují soudržnost tmelu s podkladem. Tato jeho vlastnost by měla být částečně redukována nanesením primeru před samotným tmelením.

Co se týče samotných tmelů je zde brán zřetel nejen na dostupnost pro běžného uživatele a optimální cenovou nabídku, ale i na doporučení výrobce, že tmel je vhodný pro použití při tmelení autorem vybraného podkladního materiálu. Po pečlivém průzkumu českého trhu jsou vybrány dva tmely od různých výrobců a v různých cenových kategoriích. Jedná se o tmel polyuretanový a akrylový. K těmto tmelům jsou pak vybrány také příslušné primery. Tyto primery jsou vybrány na základě doporučení od výrobce.

Vybrané tmely (Tab. 1) a základní nátěry (Tab. 2) jsou dále specifikovány v níže uvedených tabulkách.

Tab. 1 Vlastnosti tmelů.

Vlastnosti	Tmel A	Tmel B
Hustota [g/cm ³]	1,3	1,71
Pevnost v tahu [N/mm ²]	1,5	0,4
Konzistence	Tixotropní pasta	Tixotropní pasta
Elastický modul pružnosti [N/mm ²]	0,6	0,4
Tvrdość dle Shore A	37	30

Tab. 2 Vlastnosti primerů.

Vlastnosti	Tmel A	Tmel B
Hustota [g/cm ³]	1,0	1,01
Konzistence	Tekutina	Nízkoviskózní kapalina
Obsah sušiny	34	-

3 METODIKA

Zkušební metody vychází z platné české technické normy s označením ČSN EN ISO 10590, která definuje jak parametry zkušebního tělesa pro danou zkoušku, tak i přesný postup provádění této zkoušky.

Zkušební těleso je definováno skladbou a rozměry. Podkladový materiál může mít i jiné rozměry, a to za předpokladu, že zůstanou zachovány rozměry profilu tmelu a plocha přilnavosti. Pro potřeby výzkumu je zvoleno zkušební těleso skládající se ze dvou podkladních destiček ze sklocementu o rozměrech 50x30 mm a tloušťky 12,5 mm. Dále jsou použity dřevěné rozpěrky o půdorysných rozměrech 12 x 12 mm a výšce 50 mm, které s podkladními destičkami ze sklocementu ohraničují aplikovaný tmel. Pro zkoušku je od každého tmelu vyrobeno pět zkušebních vzorků, které jsou vyrobeny při udržované teplotě tmelu a podkladních těles (23 ± 2) °C. Při výrobě zkušebních vzorků musí být dodržovány pokyny výrobce tmelu. To znamená, že pokud je nutností použít základní nátěr, je třeba ho použít. Dále je třeba dodržet následující opatření: vyloučit tvorbu vzduchových bublin, přitlačit těsně tmel ke stykovým plochám podkladních těles a povrch tmelu uhladit do roviny pomocných těles a rozpěrek.

Před samotným testováním je třeba ještě vzorky uložit dle předepsaného postupu, který je definovaný normou. Nejprve je třeba uložit zkušební vzorky po dobu 28 dnů při teplotě (23 ± 2) °C a relativní vlhkosti (50 ± 5) %, aby došlo ke správnému vyvrání tmelu. Poté se zkušební vzorky podrobí třikrát následujícím cyklům uložení:

- 3 dny v sušárně při teplotě $(70 \pm 2) ^\circ\text{C}$
- 1 den v destilované vodě o teplotě $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$
- 2 dny v sušárně při teplotě $(70 \pm 2) ^\circ\text{C}$
- 1 den v destilované vodě o teplotě $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$

V normě je pak popsán samotný postup zkoušky, která byla použita pro tento příspěvek. Jedná se o zkoušku stanovení přilnavosti a soudržnosti při udržovaném protažení po ponoření do vody. Zkušební vzorky se po předchozím uložení a cyklování ponoří do nádoby s vodou, kde se nechají pět dní při teplotě $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Po pěti dnech se vzorky vyjmou z vody, a ještě před samotným testováním se uloží na 24 hodin na vzduchu při teplotě $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $(50 \pm 5) \%$. Následně se zkušební vzorky uloží do zkušebního zařízení a protahují se rychlostí $(5,5 \pm 0,7) \text{ mm/minutu}$ o 20 % jejich původní šířky. Toto protažení se udržuje po dobu 24 hodin. Po uvolnění zkušebních vzorků ze zkušebního zařízení se zaznamenávají délky a polohy poruch přilnavosti a soudržnosti.

4 VÝSLEDKY

Pro každý z vybraných tmelů je testováno pět zkušebních vzorků. Hodnocení výsledků zkoušky proběhlo vizuální kontrolou zkušebních vzorků a jejich přeměřením posuvným měřítkem. Ve výsledkové tabulce Tab. 3 uvedené níže jsou popsány výsledky zkoušky, a to včetně způsobu porušení tmeleného spoje. Pro větší přesnost při hodnocení výsledků je pak zapsána i délka porušení tmeleného spoje.

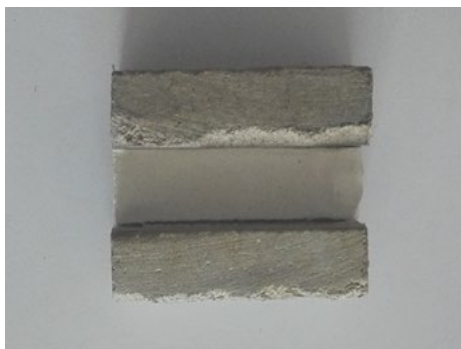
Spoj hodnocený jako Vydržel je nepoškozen, nevykazuje tedy žádné porušení a v tabulce výsledků je porucha označena slovem žádné. Neporušený spoj je možné vidět na Obr. 1, umístěném pod tabulkou výsledků. Spoj hodnocený jako Nevydržel, je pak porušen. Porušení takového spoje se projevilo jednostranným odtržením tmelu od podkladního materiálu. Délka trhliny mezi tmelem a podkladním materiálem je zapsána v tabulce. Porušený spoj je možné vidět na Obr. 2, umístěném pod tabulkou výsledků.

Tab. 3 Tabulka výsledků zkoušek.

Typ tmelu	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č.3	Vzorek č.4	Vzorek č. 5
Tmel A (Polyuretanový tmel)	Žádné	Žádné	Žádné	Jednostranné odtržení / 50 mm	Jednostranné odtržení / 35 mm
	Jednostranné odtržení / 48 mm	Jednostranné odtržení / 45 mm	Jednostranné odtržení / 30 mm	Jednostranné odtržení / 50 mm	Jednostranné odtržení / 49 mm



Obr. 1 Tmel A, vzorek č. 2.



Obr. 2 Tmel B, vzorek č. 1.

5 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Jak je patrné z výsledkové tabulky uvedené výše v části Výsledky u obou testovaných tmelů se při testování vyskytuje pouze jedna vada, a to jednostranné odtržení tmelu od podkladního materiálu. Zásadně horších hodnot si můžeme všimnout u akrylového tmelu. U tohoto tmelu došlo k jednostrannému odtržení u všech pěti testovaných vzorků o různých délkách porušení. Naopak u polyuretanového tmelu došlo k jednostrannému odtržení pouze u dvou testovacích vzorků a zbylé tři prošly zkouškou bez porušení tmeleného spoje.

6 ZÁVĚR

I přes to, že výrobci vybraných tmelů uvádí vhodnost tmelu pro tmelení vybraného podkladního materiálu, tak výsledky zkoušky dokazují, že jeho přilnavost není dostatečná a při vystavení působení vodních činitelů dochází k výraznému poškození tmeleného spoje. Není tedy možné ani jeden z těchto tmelů doporučit pro tmelení sklocementových podkladních materiálů.

Poděkování

Príspevek vznikl za podpory juniorského specifického výzkumu Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně vedeného pod označením FAST-J-20-6359 a také za podpory standardního specifického výzkumu Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně vedeného pod označením FAST-S-20-6338.

Použitá zdroje

- [1] Klosowski, J., Wolf A.T.: Sealants in construction. 2nd edition. Boca Raton: Taylorand Francis Group, 2016. ISBN 978-1-4200-1785-4.
- [2] Petrie, E.: M. Handbook of adhesives and sealants. New York: McGraw-Hill company, 2009. ISBN 0-07-049888-1.
- [3] Lal Mittal, K., Pizzi A.: Handbook of sealant technology. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2009. ISBN 978-0-8493-9162-0.
- [4] Chew, M.Z.L., Zhou, X., Tan, S.T.: On-site weathering of sealants under tropical conditions, Construction and Building Materials, Vol. 18, Issue 4, 2004, pp. 287-293.
- [5] Stögbauer, H., Wolf A.T.: The influence of heat ageing on one-part construction silicone sealants, Construction and Buildings Materials, Vol. 5, Issue 1, 1991, pp. 27-32.
- [6] WOLF, A.T.: Movement capability of sealants. Construction and Building Materials. 1991, 5, s.127–134. DOI: 10.1016/0950-0618(91)90063-Q. ISSN 09500618.
- [7] Nečasová, B., Liška P., Šlanhof J. a Juhásová Šenitková I.: Performance of selected polyurethane joint

- sealants in concrete structures. In: MATEC Web of Conferences. 2018. ISSN 2261236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201814602015
- [8] ČSN EN ISO 8340 Stavební konstrukce – Těsnící hmoty – Tmely – Stanovení tahových vlastností při udržovaném protažení. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [9] Šlanhof, J., Liška, P. a Nečasová, B.: Evaluation of test methods for testing of sealants, Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II – Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies, ESaT 2016, pp. 643-648, ISBN: 978-131539382-7.
- [10] Šlanhof, J., Šimácková, M., Liška, P., Nečasová, B.: Sealing possibilities of glass fibre reinforced concrete elements and fibre – Cement facade cladding panels Proceedings of an International Scientific Conference in Bratislava – Construction Technology and Management CTM 2014, pp. 447-455, 2014, Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava
- [11] Liška, P., Nečasová, B., Šlanhof, J. a Šimácková, M.: Determination of Tensile Properties of Selected Building Sealants in Combination with High-pressure Compact Laminate (HPL). In: Procedia Engineering. 2015, s. 199-205. ISSN 18777058.
- [12] Informace z <https://www.denbraven.cz/>
- [13] Informace z <https://cze.sika.com>

VLIV PŮSOBENÍ VODY NA ROZMĚROVÉ ZMĚNY OSB DESKY

INFLUENCE OF WATER EFFECT ON DIMENSIONAL CHANGES IN ORIENTED STRAND BOARD

Jiří Patloka^{*1}, Erika Kratochvílová¹

^{*}146277@vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie, mechanizace a řízení staveb, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

Dlouhodobé působení povětrnostních podmínek na dřevo a materiály na bázi dřeva má negativní dopad na mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu. OSB desky jsou náchylné k absorpci vody a lze tedy předpokládat, že při dlouhodobějším působením vody se projeví její vliv na rozměrových změnách. V souvislosti s touto problematikou je prováděn výzkum, jehož cílem je zjistit, do jaké míry ovlivňuje dlouhodobé působení vody nežádoucí délkovou roztažnost desky. Výsledky prezentované formou grafů poukazují na rozměrové změny zkušebních těles pro každý den pozorování. Výsledky experimentu potvrdily předpoklad, že dlouhodobé působení vody má významný vliv na změnu rozměrů OSB desky.

Klíčová slova

OSB deska, vlhkost, rozměrové změny

Abstract

Long-term effects of weather conditions on wood and wood-based materials have a negative impact on the mechanical and physical properties of the material. Oriented strand boards are prone to water absorption and it can therefore be assumed that the longer-term action of water will affect its dimensional changes. In connection with this issue, research is being carried out, the aim of which is to find out to what extent the long-term action of water affects the undesired longitudinal expansion of the board. The results presented in the form of graphs indicate the dimensional changes of the test specimens for each day of observation. The results of the experiment confirmed the assumption that long-term exposure to water has a significant effect on changing the dimensions of the OSB board.

Key words

Oriented strand board, moisture, dimensional changes

1 ÚVOD

Dřevostavby jsou dnes nedílnou součástí výstavby rodinných domů i bytové výstavby. Rok 2019 zaznamenal mírný útlum celého stavebnictví, přesto každý sedmý rodinný dům byl konstruován jako dřevostavba a jejich podíl na trhu činil 14,94 % [1]. Narůstající trend a oblíbenost dřevostaveb si lze vysvětlit mnoha faktory, mezi přední s určitostí patří rychlost výstavby a omezení mokřích procesů.

Opláštění dřevostaveb je tvořeno OSB deskami. Při jejich použití v exteriéru pak tvoří klíčovou roli odolnost vůči vlhkosti a srážkové vodě. Především během procesu výstavby, před dokončením finální povrchové úpravy, mohou být vystaveny účinkům srážkové vody [2]. Není však ojedinělou výjimkou, že dřevostavby zpravidla s jinou funkcí než pro bydlení, plášť z OSB desek nechrání před klimatickými účinky aplikací následných vrstev z několika hledisek. Ať už pro svůj originální vzhled, kdy jsou záměrně ponechávány v exteriéru viditelně pro svůj nezaměnitelný dekorativní charakter nahrazující například palubkové obklady, což je spojeno s moderním chápáním architektury, tak pro mylné porozumění zejména laické veřejnosti odolnosti desek vůči vlhkosti a vodě dle klasifikace ČSN EN 300. Normou označovaná OSB/4 zvláště zatížitelná nosná deska pro použití ve vlhkém

prostředí, tedy deska nejvyšší vyráběné jakosti, je pro své označení a také vyšší cenu chybně chápána jako voděodolná [3]. Jejich odolnost je však stupňována vůči vzdušné vlhkosti.

OSB desky, obecně dřevěné materiály a materiály na bázi dřeva, pracují v návaznosti na prostředí ve kterém se nachází, teplotě a vlhkosti. Synergický účinek povětrnostních podmínek má za následek objemové změny desek. V případě aplikace tenkovrstvé fasádní omítky či kontaktního zateplovacího systému na tento podklad pak mohou tyto objemové změny způsobit prokreslení spár, vznik trhlin, ale představují i riziko odloupení celého omítkového souvrství [4].

Príspevek je zaměřen na sledování účinku dlouhodobého působení vody na OSB desku. Pozorovány jsou rozměrové změny desek, konkrétně jejich délková roztažnost v závislosti na počtu dní vystavení účinkům vody.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Je známo, že dřevo a potažmo materiály na bázi dřeva jsou náchylné k absorpci vody. Odolnost OSB desky proti vlhku ovlivňuje její složení, tedy typ materiálu, hustotní profil, množství a složení lepidla a parafin [5], [6], [7]. Výsledky dřívějšího výzkumu autorů prokázaly rozměrovou nestálost OSB desky po uložení ve vodě [8]. Toto potvrzují i jiné výzkumy sledující hodnotu tloušťkového bobtnání v závislosti namáhání různými stupni relativní vlhkosti vzduchu [5], [9]. Lze tedy předpokládat, že účinek vody bude mít vliv i na délkovou roztažnost. Přístup evropské normy ČSN EN 318 se zaobírá problematikou rozměrových změn, avšak pouze v závislosti na změnách relativní vlhkosti vzduchu, nikoliv působení vody [10]. Výzkumy opřené o tento normativní přístup potvrzují vliv relativní vlhkosti vzduchu na délkovou roztažnost [11]. Výzkum autorů bude sledovat délkovou roztažnost OSB desky, avšak při namáhání desek trvalým ponořením ve vodě, po několik dnů.

3 MATERIÁLY A METODIKA

Zkušební tělesa

Pro účely výzkumu byla odebírána zkušební tělesa z desek OSB/4 tloušťky 15 mm v souladu s normou ČSN EN 326-1 [12]. Všechna zkušební tělesa jsou z desek jednoho výrobce stejné šarže. Tyto desky jsou normou klasifikovány jako zvlášť zatížitelné nosné desky pro použití ve vlhkém prostředí [3]. Základní parametry desky jsou uvedeny v Tab. 1. Rozměry zkušebních těles byly voleny s ohledem na technické možnosti měřících přístrojů (rozsah měření) 100 × 25 mm a 50 × 30 mm v celkovém počtu 5 ks každého rozměru. Zkušební tělesa byla nejprve klimatizována do konstantní hmotnosti při střední relativní vlhkosti vzduchu 65 % a teplotě 21 °C.

Tab. 1 Výrobní charakteristiky OSB/4.

Materiál	množství
Podíl dřeva (měkké dřevo, především borovice, smrk, obsah tvrdého dřeva do max. 30 %)	85–92 %
Vlhkost dřeva	4–6 %
PMDI lepidlo v povrchové a jádrové vrstvě	3–6 %
Parafinová emulze	≤1 %
Hustota	600–640 kg/m ³
Lisovací tlak	150–250 bar

Zkušební postup

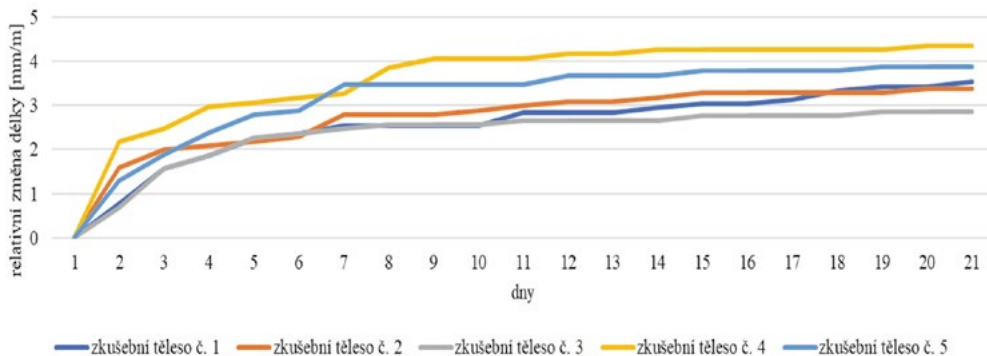
Podstatou výzkumu je stanovení rozměrových změn desky vystavené dlouhodobému účinku působení vody. Při tomto výzkumu lze vycházet z dvou normových postupů. Přičemž první přístup vychází z ČSN EN 318 a sleduje vliv vlhkosti na změnu délky u klimatizovaných zkušebních těles. Určuje tak způsob měření a vyhodnocení relativní změny délky zkušební tělesa δ_l vycházející z vzorce (1) [13].

$$\delta_l = \frac{l_2 - l_1}{l_1} 1000 \quad (1)$$

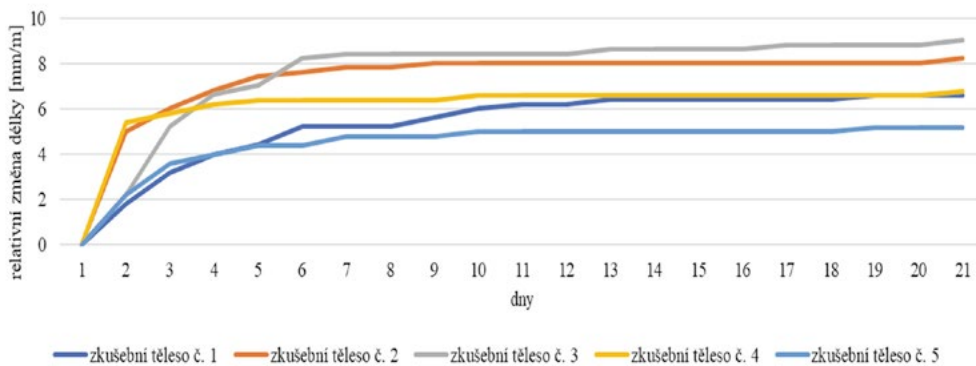
kde δ_l je relativní změna délky v milimetrech na metr, l_1 je délka zkušebního tělesa před ponořením v milimetrech, l_2 délka zkušebního tělesa po ponoření v milimetrech.

Norma ČSN EN 317 sleduje působení účinků vody na přírůstek tloušťky zkušebních těles po úplném ponoření do vody. Norma určuje způsob ponoření zkušebních těles, ty jsou ponořeny svisle do čisté klidné vody s teplotou $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Zkušební tělesa jsou během ponoření od sebe navzájem, ode dna a stěn nádoby vodní lázně, oddělena. Horní boky zkušebních těles musí být 25 mm pod hladinou vody a voda se po každé zkoušce vymění [14]. Po uplynutí doby ponoření 24 hodin byla zkušební tělesa vyjmuta z vody, byl odstraněn zbytek vody a změřena délka tělesa posuvným měřidlem v stanovené poloze. Zkušební tělesa byla ponořena ve vodní lázni 20 dnů.

4 VÝSLEDKY



Obr. 1 Grafické znázornění křivek zvyšování délkové roztažnosti v souvislosti s působením vody u zkušebních těles 100×25 mm.



Obr. 2 Grafické znázornění křivek zvyšování délkové roztažnosti v souvislosti s působením vody u zkušebních těles 50×30 mm.

5 DISKUZE

Z výše uvedených graficky znázorněných křivek zvyšování délkové roztažnosti Obr. 1 a Obr. 2 je patrný významný vliv působení vody. Z dosažených výsledků lze usuzovat, že významnou roli na délkovou roztažnost vlivem působení vody tvoří velikost zkušebních těles. Průměrná relativní změna délky u zkušebních těles rozměru 100×25 mm dosáhla hodnoty 3,6 mm/m. U menších těles rozměru 50×30 mm průměrná hodnota dosahuje 7,19 mm/m. Tyto významné rozdíly lze vysvětlit smáčenou plochou řezu, která je svojí strukturou méně odolná než přední či zadní plocha desky zkušebního tělesa. Dlouhodobější působení vody se nejprve projevovalo právě

v řezných hranách bobtnáním, což bylo zřetelné pouhým okem. Předpoklad většího vniku vlhkosti a vody do OSB desky právě řeznými hranami připouští Morley a Way [15], [16]. Nepravidelný transport vody ve zkušebním vzorku je ovlivněn imperfekcemi OSB desek, mezi něž jsou řazeny náhodně uspořádané dutiny různých velikostí vznikající již při výrobním procesu, dále pak různorodé schopnosti jednotlivých třísek vést vodu v důsledku nerovnoměrného obalení váleci třísek pryskyřicí a výskyt uzlů [15], [17].

Rozdíly lze sledovat také v ustálení křivek délkové roztažnosti, kdy menší tělesa byla nasycena o několik dní dřívě. U menších těles se křivky téměř stabilizovaly po 6. dni měření, což dokládá grafické znázornění na Obr. 2. Oproti tomu u větších zkušebních těles Obr. 1 se křivky téměř ustálil po 9. dni měření.

6 ZÁVĚR

Na základě provedených experimentů lze potvrdit předpoklad významného vlivu dlouhodobého působení vody. Délková změna OSB desek v závislosti na působení vody není výrobcem udávána. Měla by se však řadit mezi důležité vlastnosti velkoformátových desek. Je-li totiž zabráněno volnému rozpínání desek v konstrukci, může vnitřní napětí dosáhnout takové hranice, kdy způsobí samotné porušení desek, poškození spojovacích prostředků či případnou destrukci celé konstrukce. Kritický nárůst změny v délce zkušebních těles se projevil v prvních dnech měření, ustálení křivek délkové roztažnosti nastalo do 9 dní, avšak je nutné konstatovat, že nárůst délky tělesa pokračuje i nadále a ani po 20 dnech expozice není dosaženo ustáleného stavu. Ve výše uvedeném šetření bylo zjištěno, že se délková roztažnost u rozměrově odlišných vzorků projevila v jiném rozsahu. Z tohoto důvodu se nabízí jako následný krok výzkumu zaměřit se na větší zkušební soubor zkušebních těles zahrnující více rozměrových variant, stanovit hypotézu chování při vlivu působení vody a tuto hypotézu následným zkoumáním potvrdit nebo vyvrátit.

Použité zdroje

- [1] TRANDOVÁ, Lenka. Každý sedmý rodinný v Česku je ze dřeva. In: admd.cz [online]. 9. 6. 2020 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.admd.cz/aktuality/kazdy-7-rodinny-dum-v-cesku-je-ze-dreva>
- [2] EVANS, Philip D., Martin MIESNER a Doug ROGERSON. Machined tapers reduce the differential edge swelling of oriented strand board exposed to water. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2013, 50, 15-21 [cit. 2020-11-13]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2013.01.021.
- [3] ČSN EN 300: Desky z orientovaných plochých třísek (OSB) - Definice, klasifikace a požadavky. Praha: Český normalizační institut, 2006, 20 s., Třídící znak 492615.
- [4] Desky z třísek. In: chatar-chalupar.cz [online]. [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.chatar-chalupar.cz/desky-z-trisek/>
- [5] BÖHM, M, K KOBETIČOVÁ, J PROCHÁZKA a R ČERNÝ. Moisture sorption and thickness swelling of wood-based materials intended for structural use in humid conditions and bonded with melamine resin. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2019, 549 [cit. 2020-11-13]. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/549/1/012042
- [6] LÖTTER, Barend T. a Philip D. EVANS. Sprayable hot melt waxes as water repellents for oriented strand board. *International Wood Products Journal* [online]. 2019, 10(3), 102-110 [cit. 2020-11-13]. ISSN 2042-6445. Dostupné z: doi:10.1080/20426445.2019.1637609
- [7] DOS SANTOS, Priscila Carneiro a Cláudio Henrique S. DEL MENEZZI. Effect of the densification process on properties of commercial oriented strand boards. *European Journal of Wood and Wood Products* [online]. 2018, 76(6), 1707-1713 [cit. 2020-11-13]. ISSN 0018-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00107-018-1354-4
- [8] KRATOCHVÍLOVA, Erika, Jiri PATLOKA a Jiri SLANHOF. Optimisation of Surface Finishes for Oriented Strand Board in Order to Increase Its Moisture Resistance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2019, 603 [cit. 2020-11-13]. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/603/3/032049
- [9] MIRSKI, Radosław, Adam DERKOWSKI a Dorota DZIURKA. Dimensional Stability of OSB Panels Subjected to Variable Relative Humidity: Core Layer Made with Fine Wood Chips. *BioResources* [online]. 2013, 8(4), 6448-6459 [cit. 2020-11-13]. ISSN 1930-2126. Dostupné z: doi:10.15376/biores.8.4.6448-6459
- [10] ČSN EN 318: Desky ze dřeva - Stanovení rozměrových změn v závislosti na změnách relativní vlhkosti vzduchu. Praha: Český normalizační institut, 2003, 12 s., Třídící znak 490145.
- [11] MIRSKI, R.; DZIURKA, D.; DERKOWSKI, A. Dimensional stability of oriented strand boards with external layers made of non-strand chips: Changes in board length [online]. 2017, 12 (4),

- 7107-7117 [cit. 2020-11-13]. ISSN 19302126. Dostupné z: doi:10.15376/biores.12.4.7107-7117.
- [12] ČSN EN 326-1. Desky ze dřeva - Odběr vzorků, nařezávání a kontrola - Část 1: Odběr vzorků, nařezávání zkušebních těles a vyjádření výsledků zkoušky. Praha: Český normalizační institut, 1997, 12 s. Třídící znak 49 0184.
- [13] ČSN EN 318. Desky ze dřeva - Stanovení rozměrových změn v závislosti na změnách relativní vlhkosti vzduchu. Praha: Český normalizační institut, 2003, 12 s. Třídící znak 49 0145.
- [14] ČSN EN 317. Trískové a vláknité desky: Stanovení bobtnání po uložení ve vodě. Praha: Český normalizační institut, 1995, 8 s. Třídící znak 49 0166.
- [15] MORLEY, Michael. Building with Structural Insulated Panels (SIPs): Strength and Energy Efficiency Through Structural Panel Construction. Newtown (Connecticut, USA): The Taunton Press, 2000, 186 s. ISBN 1-56158-351-0.
- [16] WAY, Daniel, Frederick A. KAMKE a Arijit SINHA. Influence of specimen size during accelerated weathering of wood-based structural panels. Wood Material Science & Engineering [online]. 2018, , 1-13 [cit. 2020-11-15]. DOI: 10.1080/17480272.2018.1459836. ISSN 1748-0272. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17480272.2018.1459836>
- [17] LI, Wanzhao, Jan VAN DEN BULCKE, Thomas DE SCHRYVER a Joris VAN ACKER. Investigating water transport in MDF and OSB using a gantry-based X-ray CT scanning system. Wood Science and Technology [online]. 2016, 50(6), 1197-1211 [cit. 2020-11-15]. DOI: 10.1007/s00226-016-0855-8. ISSN 0043-7719. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00226-016-0855-8>

VZLÍNÁNÍ VLHKOSTI V OSB DESCE OPATŘENÉ RŮZNÝMI DRUHY POVRCHOVÝCH ÚPRAV

RISING DAMP IN ORIENTED STRAND BOARD TREATED WITH DIFFERENT TYPES OF SURFACE FINISHES

Erika Kratochvílová^{*1}, Jiří Patloka¹

^{*}144679@vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie, mechanizace a řízení staveb, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

Výzkum navazuje na předchozí práci autorů, kterou je optimalizace povrchových úprav OSB desky za účelem zvýšení její odolnosti proti vlhkosti. Zkušební vzorky z OSB desky bez povrchové úpravy a vzorky opatřené celoplošně různými druhy nátěrů, nástřiků, stěrek a penetrací jsou nyní podrobeny destruktivní zkoušce, která umožňuje sledovat postup vzlínání vlhkosti ve vzorcích po dobu 5 dnů. Výsledky jsou prezentovány formou grafů znázorňujících nárůst vlhkosti ve zkušebních vzorcích pro každý den pozorování. Výsledky experimentu potvrzují předpoklad, že povrchová úprava má značný vliv na zpomalení vzlínání vody v OSB desce.

Klíčová slova

OSB, vzlínající vlhkost, povrchová úprava

Abstract

The research follows previous work of the authors related to optimisation of surface finishes for OSB in order to increase its moisture resistance. The OSB samples without surface finish and the samples treated with different types of coating, spray, screed and primer across their whole surface are subjected to a destructive test in which the height of the rising damp is determined for 5 consecutive days. The results include graphs showing rise of dampness in the samples for each day of observation. The results of the experiment confirm the assumption that the choice of surface finish has a significant effect on slowing down the rise of dampness in OSB.

Key words

OSB, rising damp, surface finish

1 ÚVOD

OSB desky jsou velice rozšířeným stavebním materiálem na bázi dřeva. Využívají se k opláštění stěn, střech i jako součást podlahových nebo stropních konstrukcí. Jsou nejčastěji využívaným materiálem v technologii SIPs (Structural Insulated Panels), kde se panely opláštěné OSB deskami využívají i k založení stavby například na základových pasech, patkách nebo zemních vrutech [1].

Známostou nevýhodou OSB desek je jejich náchylnost k absorpci vody. Při procesu výstavby však bývá někdy vystavení OSB desek účinkům srážkové vody před uzavřením pláště budovy nevyhnutelné. V důsledku toho pak dochází k jejich bobtnání, čímž je narušena jejich rozměrová stálost. To se jeví jako značný problém zejména u podlahových panelů [2], [3]. V případě nahromadění většího množství srážkové vody pak může hrozit i její vzlínání do svislých konstrukcí.

Výzkum navazuje na předchozí práci autorů zaměřenou na možnost zvýšení odolnosti OSB desek proti absorpci vody a zajištění jejich rozměrové stálosti pomocí vhodné povrchové úpravy [4]. Účinek již dříve zvolených a testovaných povrchových úprav je nyní ověřován pomocí destruktivní zkušební metody, která umožňuje sledovat postup vzlínání vody v OSB desce na základě zjišťování vlhkosti.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Použití vhodné povrchové úpravy má potenciál snížit bobtnání OSB desky a zajistit její rozměrovou stálost. Osvědčila se například aplikace vysoce elastického polyuretanového nátěru [5], ošetření povrchu OSB desky stříkaným roztaveným voskem [2], nátěr povrchovou úpravou vytvrzenou UV-zářením po předchozím broušení povrchu desky [6] nebo aplikace nanotechnologické sloučeniny [7]. Účinky všech zmíněných povrchových úprav jsou však ověřeny pouze z krátkodobého hlediska.

Seznam povrchových úprav použitých při výzkumu za účelem sledování vzlinání vody v OSB desce je uveden v Tab. 1. Jedním z kritérií pro jejich výběr je co nejsnadnější aplikace bez potřeby předchozí mechanické úpravy povrchu desky jako například broušení [6]. Dále je snaha volit úpravy na trhu běžně dostupné a cenově přijatelné. Účinek těchto povrchových úprav je již testován a vyhodnocen na základě sledování růstu hmotnosti a bobtnání OSB desek po uložení ve vodě a také na základě stanovení odolnosti proti vlhkosti zkouškou cyklováním, a to z dlouhodobého hlediska ve všech případech. Výsledky experimentů potvrzují předpoklady významného vlivu povrchové úpravy OSB desky vystavené dlouhodobějšímu působení vlhkosti [4].

3 MATERIÁLY A METODIKA

Specifikace použitých materiálů

Tab. 1 Seznam testovaných povrchových úprav.

Číslo povrchové úpravy	Popis povrchové úpravy nebo její skladby
1	1× silikonový hydroizolační nátěr
2	1× jednosložková hydroizolační stěrka na bázi polymerů
3	1× penetrační vodní emulze akrylického kopolymeru 2× korková směs pro aplikaci stříkáním (organická směs drceného korku, akrylátové emulze ve vodní disperzi, pigmentů a vody)
4	2× lak k ošetřování dřeva vhodný pro provádění základních nátěrů (složení: akrylát, TiO ₂ , BaSO ₄ , lakový benzín, Na-fosfát, voda, konzervační přísada)
5	2× akrylátová barva na dřevo (složení: akrylát, TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , křemičitan, lakový benzín, glycol, konzervační přísada, voda)
6	1× přípravek na vodní bázi na ochranu čelních ploch dřeva (Složení: 5-chlor-2-methyl-2H-isothiazol-3-on and 2-methyl-2H-isothiazol-3-on (3:1), 1,2-benzisothiazol-3(2H)-on)
7	1× adhezivní můstek (jednosložkový bezrozpuštědlový nátěr, směs plniv a kameniv ve vodné styren-akrylátové disperzi)
8	1× přípravek ke zpevnění dřeva na polyuretanové bázi (složení: diphenylmethan-4,4'-diisocyanat, rozmezí aromat. uhlovodíků C ₉ -C ₁₁ , diphenylmethan-2,4'-diisocyanat, hexamethylen-1,6-diisocyanat homopolymer) 2× lak k ošetřování dřeva vhodný pro provádění základních nátěrů (viz povrchová úprava 4)

Celkem 8 typů povrchových úprav vhodných pro OSB desky je aplikováno na zkušební tělesa. Některé z nich vyžadují dle pokynů výrobce aplikaci ve více vrstvách nebo ve skladbě s dalším přípravkem. K vybraným úpravám se nevztahují speciální požadavky na úpravu povrchu samotné OSB desky před jejich aplikací, pouze zbavení

případných nečistot či mastnoty. Kromě korkové směsi určené ke stříkání je možné všechny úpravy aplikovat natíráním. Seznam použitých povrchových úprav a jejich skladeb je uveden v Tab. 1.

Pro účely výzkumu je vybrána deska OSB/4, která je normou klasifikována jako zvlášť zatížitelná nosná deska pro použití ve vlhkém prostředí [8]. Je použita komerční OSB deska jednoho z hlavních distributorů na českém trhu s tloušťkou 15 mm. Výrobce uvádí následující složení: 85–92 % absolutně suché dřevo (především jehličnaté dřevo typu borovice nebo smrk, obsah tvrdého dřeva max. 30 %), 4–6 % voda (vlhkost dřeva), 3–6 % PMDI lepidlo, ≤1 % emulze parafinového vosku. Garantovaná charakteristická objemová hmotnost těchto desek je větší než 600 kg/m³.

Všechny vzorky jsou nařezány z OSB desek tloušťky 15 mm od stejného výrobce, se stejným číslem výrobní šarže. Pro destruktivní metodu zjišťování vztlínání vlhkosti v OSB desce jsou připraveny vzorky o rozměrech 15 x 200 mm. Při volbě velikosti vzorků je bráno v potaz odřezávání částí vzorků ruční pilou. Tak jako při zjišťování bobtnání po uložení ve vodě jsou nejprve vzorky klimatizovány do konstantní hmotnosti při střední relativní vlhkosti vzduchu 65 % a teplotě 21 °C [4], [9].

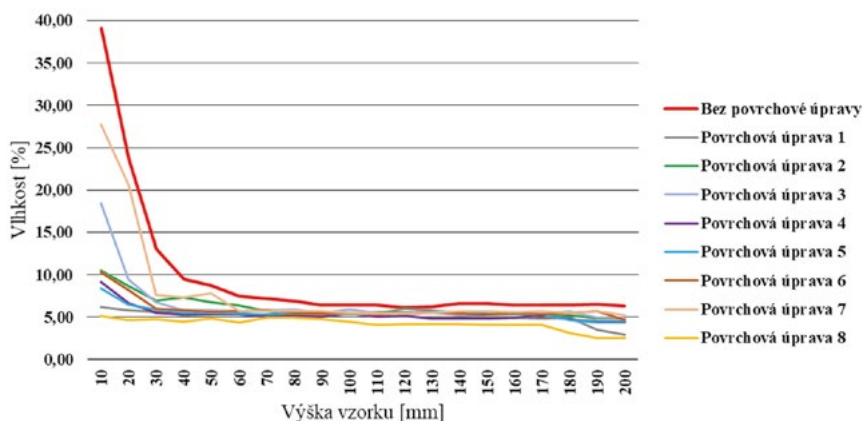
Destruktivní zkouška pro zjištění vztlínání vody v OSB desce

Podstatou této zkoušky je zjištění, jak vysoko vyvzlíná voda ve zkušebním tělese stojícím v nádobě s vodou s úrovní hladiny 10 mm nad dnem nádoby. Nádoba se zkušebními tělesy je umístěna ve stejné místnosti se stejnými podmínkami, kde bylo v předchozím kroku dosaženo konstantní hmotnosti vzorků. Jedná se o destruktivní zkoušku využívající gravimetrickou metodu. Pro každou povrchovou úpravu je připraveno celkem 15 vzorků ošetřených povrchovou úpravou celoplošně a jedna sada vzorků bez povrchové úpravy. Vzorky jsou kratší stranou postaveny do vody s úrovní hladiny ve výšce vzorku 10 mm. Měření trvá celkem 5 dnů. Vždy v intervalu 24 hodin jsou 3 vzorky z vody vytaženy, umístěny do ochranného obalu, aby nedocházelo k odpařování vody a po každých 10 mm jsou z nich postupně odřezávány menší části, které jsou ihned po odběru zváženy s přesností na 0,001 g. Poté jsou vysušeny při teplotě 105 °C do konstantní hmotnosti [10] a opětovně zváženy s přesností na 0,001 g. Vlhkost postupně odřezávaných jednotlivých částí zkušebního tělesa H se udává v procentech hmotnosti a vypočítá se dle následujícího vzorce (1), který vychází z normy ČSN EN 322 [10]:

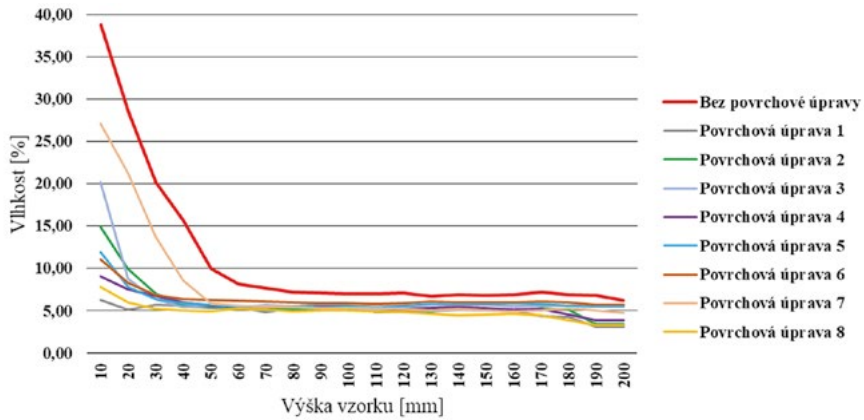
$$H = \frac{m_H - m_o}{m_o} 100 \quad (1)$$

kde m_H je hmotnost části zkušebního tělesa při prvním vážení po odběru vzorku v gramech a m_o je hmotnost části zkušebního tělesa při vážení po vysušení v gramech. Výsledky získané aritmetickým průměrem jsou vyneseny do 5 grafů závislosti vypočítaného obsahu vlhkosti na výšce vzorku.

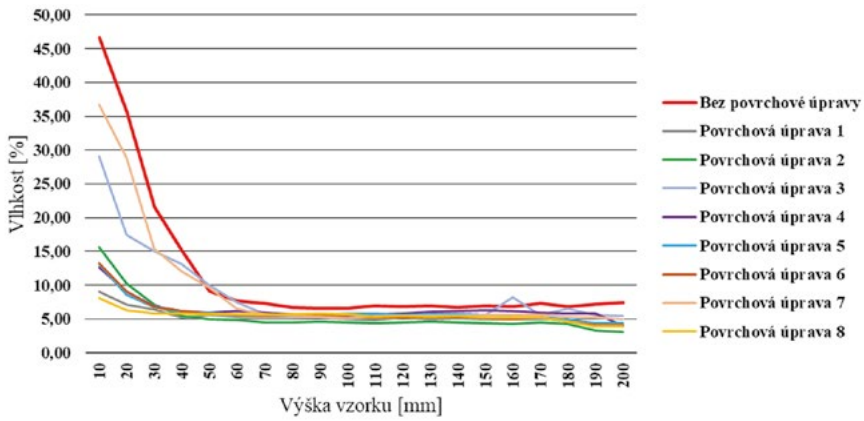
4 VÝSLEDKY



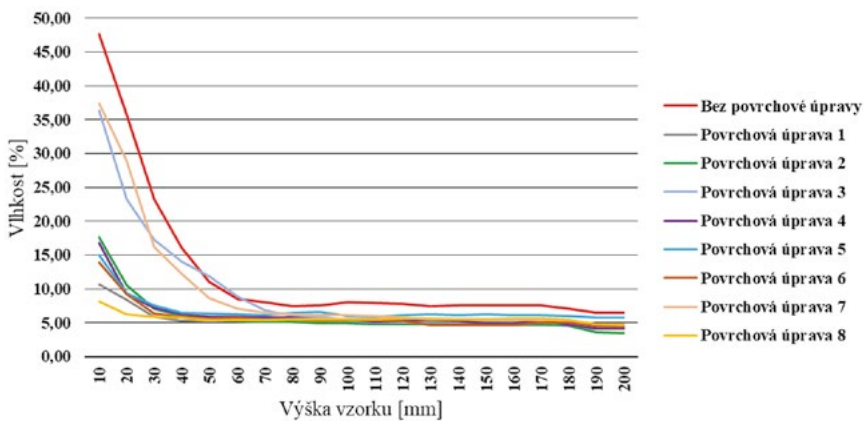
Obr. 1 Grafické znázornění výsledků destruktivní zkoušky – den 1.



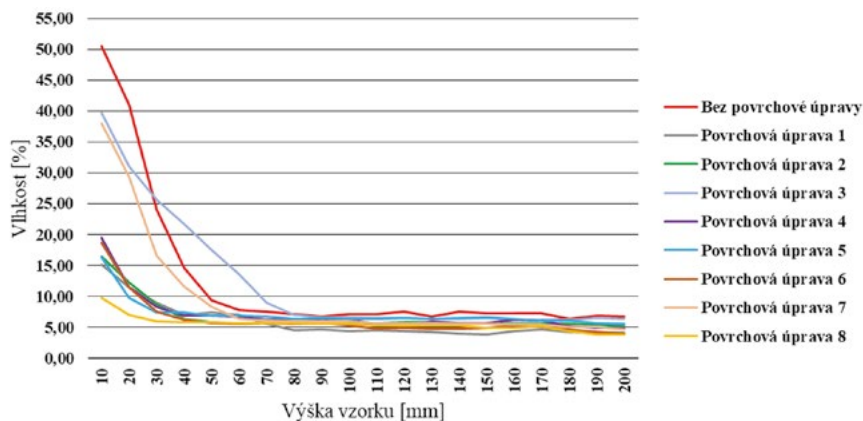
Obr. 2 Grafické znázornění výsledků destruktivní zkoušky – den 2.



Obr. 3 Grafické znázornění výsledků destruktivní zkoušky – den 3.



Obr. 4 Grafické znázornění výsledků destruktivní zkoušky – den 4.



Obr. 5 Grafické znázornění výsledků destruktivní zkoušky – den 5.

5 DISKUZE

Norma ČSN EN 300 udává požadavek na vlhkost obsaženou v OSB deskách expedovaných od výrobce v rozmezí 2–12 % [8]. Všeobecně pro dřevo ve stavebních konstrukcích platí, že vlhkost by neměla překročit 20 %, přičemž dřevo s trvalou vlhkostí do 12 % není třeba dále chránit před napadením biotickými škůdci [11]. Výrobce použitých OSB desek udává obsah vlhkosti 4–6 %. Na základě tohoto údaje lze tedy předpokládat, že při naměřeném obsahu vlhkosti $\leq 6\%$ se jedná o výšku, do které již voda nevyvzlínala. V případě hodnot nad 20 % se dá hovořit o vysokém obsahu vlhkosti.

Kromě stříkané korkové směsi – skladba 3 a adhezivního můstku – skladba 7, dokáží všechny povrchové úpravy udržet vlhkost pod kritickou hranicí 20 % po celých 5 dnů měření. Skladba 3 si tak oproti výsledkům z předchozí fáze výzkumu, kdy byly povrchové úpravy hodnoceny na základě bobtnání [4], významně pohoršila. Je to dáno tím, že zrna drceného korku ve směsi obsažená mají tendenci se sama nasáknout vodou a zjistit rozdíl mezi množstvím vody absorbované deskou a samotnou povrchovou úpravou není možné, neboť povrchová úprava před vážením jednotlivých částí zkušebních těles není od OSB desky oddělena. Ze stejného důvodu se objevují i výkyvy u této skladby ve větších výškách vzorku v případě třetího dne měření, což ilustruje graf na Obr. 3. Zvýšená vlhkost, která se zde projevuje s největší pravděpodobností není obsažena v OSB desce, nýbrž pouze v povrchové úpravě. Také skladba 2 – jednosložková hydroizolační stěrka si oproti předchozí fázi výzkumu, kdy byla označena za nejlepší [4], pohoršila. I v tomto případě má totiž povrchová úprava sama o sobě tendenci nasáknout vodou. Na základě zjišťování vzlínání vody v OSB desce lze jako nejlepší povrchovou úpravu vyhodnotit číslo 8 – skladbu se zpevňovačem dřeva na polyuretanové bázi.

6 ZÁVĚR

Výsledky experimentů potvrdily, že vhodně zvolená povrchová úprava může zpomalit vzlínání vody v OSB desce. Minimálně po dobu 5 dnů při vystavení přímým účinkům vody může úprava zabránit, aby v OSB desce došlo k nahromadění vysokého obsahu vlhkosti. Nevhodná povrchová úprava naopak může sama o sobě způsobit, že voda díky ní dokáže vyvzlínat ještě výše než v OSB desce bez povrchové úpravy. Nicméně na základě experimentů provedených již v předchozí etapě výzkumu, kdy byly účinky povrchových úprav posuzovány na základě bobtnání OSB desek, lze usuzovat, že v takovém případě je většina vlhkosti nahromaděna právě v samotné povrchové úpravě a do OSB desky se nedostává. Dalším krokem výzkumu je ověření získaných výsledků nedestruktivní zkouškou provedenou s pomocí příloženého vlhkoměru.

Použitá zdroje

- [1] MORLEY, Michael. Building with Structural Insulated Panels (SIPs): Strength and Energy Efficiency Through Structural Panel Construction. Newtown (Connecticut, USA): The Taunton Press, 2000, 186 s. ISBN 1-56158-351-0.

- [2] LÖTTER, Barend T. a Philip D. EVANS. Sprayable hot melt waxes as water repellents for oriented strand board. *International Wood Products Journal* [online]. 2019, 1-9 [cit. 2020-11-14]. DOI: 10.1080/20426445.2019.1637609. ISSN 2042-6445. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20426445.2019.1637609>
- [3] EVANS, Philip D., Martin MIESNER a Doug ROGERSON. Machined tapers reduce the differential edge swelling of oriented strand board exposed to water. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2013, 50, 15-21 [cit. 2020-11-14]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2013.01.021
- [4] KRATOCHVILOVA, Erika, Jiri PATLOKA a Jiri SLANHOF. Optimisation of Surface Finishes for Oriented Strand Board in Order to Increase Its Moisture Resistance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2019, 603 [cit. 2020-11-14]. DOI: 10.1088/1757-899X/603/3/032049. ISSN 1757-899X. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/603/3/032049>
- [5] SCHMID, Volker a Özkan YILDIZ. Zum konstruktiven Holzschutz mit hochelastischen Polyurethan-Spritzelastomeren. *Bautechnik* [online]. 2014, 91(1), 15-22 [cit. 2020-11-14]. DOI: 10.1002/bate.201300078. ISSN 09328351. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/bate.201300078>
- [6] EVANS, P. D. a I. CULLIS. Effect of sanding and coating with UV-cured finishes on the surface roughness, dimensional stability and fire resistance of oriented strandboard. *Holz als Roh- und Werkstoff* [online]. 2008, 66(3), 191-199 [cit. 2019-11-03]. DOI: 10.1007/s00107-008-0238-4. ISSN 0018-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00107-008-0238-4>
- [7] MANTANIS, George I. a Antonios N. PAPADOPOULOS. Reducing the thickness swelling of wood based panels by applying a nanotechnology compound. *European Journal of Wood and Wood Products* [online]. 2010, 68(2), 237-239 [cit. 2020-11-14]. ISSN 0018-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00107-009-0401-6
- [8] ČSN EN 300. Desky z orientovaných plochých třísek (OSB): Definice, klasifikace a požadavky. Praha: Český normalizační institut, 2006, 20 s. Třídící znak 49 2615.
- [9] ČSN EN 317. Třískové a vláknité desky: Stanovení bobtnání po uložení ve vodě. Praha: Český normalizační institut, 1995, 8 s. Třídící znak 49 0166.
- [10] ČSN EN 322. Desky z dřeva. Zisťovanie vlhkosti. Praha: Český normalizační institut, 1994, 8 s. Třídící znak 49 0143.
- [11] BLAHA, Martin a Ladislav BUKOVSKÝ. Prevence a odstraňování vlhkosti. 2. vyd. Brno: ERA, 2006. Stavíme. ISBN 80-7366-051-2.

ÚČINNOSŤ MAGNETOKINETICKÝCH METÓD PRI SANÁCIÍ HISTORICKÝCH KONŠTRUKCIÍ

EFFICIENCY OF MAGNETOKINETIC METHODS IN THE REHABILITATION OF HISTORICAL CONSTRUCTIONS

Patrik Šťastný^{*,1}

^{*}patrik.stastny@stuba.sk

¹Katedra technológie stavieb, Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovensko

Abstrakt

Aplikáciou menej invazívnych technológií pri sanácii historických stavieb proti vlhkosti by sme mali docieľiť čo najväčšie zachovanie pôvodnej historickej hmoty. Sú však tieto technológie účinné? Túto otázku je potrebné zodpovedať. Preto je potrebné dané metódy skúmať a zamerať sa na ich účinnosť, čo by malo napomôcť k zefektívneniu sanácie. V tomto príspevku sa zameriame na technológie bezdrôtového odvlhčenia. Ich účinnosť bola skúmaná na dvoch historických konštrukciách, kde boli tieto technológie aplikované približne pred desiatimi rokmi. Výsledky naznačujú, že tieto technológie nie sú schopné zabezpečiť odvlhčenie týchto konštrukcií, čo môže mať pre jednotlivé objekty fatálne následky spôsobené vplyvom vlhkosti.

Kľúčové slova

Protivlhkostná analýza, vlnová elektroosmóza, magnetokinetická metóda, sanácia, stúpajúca vlhkosť

Abstract

By applying less invasive technologies in the remediation of historical buildings against moisture, we should achieve the greatest possible preservation of the original historical material. But are these technologies effective? This question needs to be answered. Therefore, it is necessary to examine the methods and focus on their effectiveness, which should help streamline remediation. In this paper we focus on wireless dehumidification technologies. Their effectiveness was investigated on two historical constructions, where these technologies were applied about ten years ago. The results suggest that these technologies are not able to provide dehumidification of these constructions, which can have fatal consequences for individual objects due to the effects of moisture.

Key words

Anti-humidity analysis, wave electroosmosis, magnetokinetic method, remediation, rising damp

1 ÚVOD

Stúpajúca vlhkosť, resp. vlnutie konštrukcií možno považovať za globálny problém týkajúci sa nie len nášho klimatického pásma, ba práve naopak možno tento jav pozorovať globálne pri rôznych typoch historických konštrukcií. Taktiež je vplyv tejto vlhkosti ľudstvu známy už veľmi dlhú dobu, o čom napovedá aj dielo Rímskeho architekta Vitruvia [1], kde opisuje isté formy boja proti vlhkosti v objektoch.

Pôvod vlhkosti môžeme pripisovať viacerým faktorom, ako sú napríklad rôzne náhodné príčiny súvisiace s prenikaním vody z potrubí, dažďových zvodov, kondenzáciou vodných pár, difúziou vodných pár, absorpciou, nasiakavosťou, kapilárnym vzlianim a mnohým ďalším javom. Existuje mnoho stavieb, ktoré práve vplyvom vlhkosti strácajú svoju užívateľnosť a mnohokrát má táto vlhkosť za následok deštrukciu jednotlivých konštrukčných prvkov, čo často vedie k úplnej deštrukcii objektov. Ako vhodný príklad môžeme uviesť, že približne polovica obnov pamiatok v Belgicku súvisí s vysokou mierou vlhkosti a zasolenia konštrukcií [2].

Vlhkosť nachádzajúca sa v týchto konštrukciách nevlýva len na jednotlivé konštrukčné prvky objektu, ale taktiež pôsobí negatívne na osoby, ktoré sa v takomto objekte nachádzajú a sú dlhodobo vystavované tejto vlhkosti a spôsobuje im rôzne respiračné ochorenia. Na tento fakt upozornil už v roku 1892 Kenwood vo svojej publikácii [3], kde opísal negatívne účinky tejto vlhkosti. Bohužiaľ tento fakt sa dlhé roky nepovažoval za reálnu hrozbu a bol niekoľko desaťročí prehlíadaný. Dnes je samozrejmé, že s týmto problémom je nutné bojovať najmä pri ochrane historických stavieb, ako súčasť zachovania kultúrneho dedičstva jednotlivých národov, avšak aj napriek

tomu je odstránenie stúpajúcej vlhkosti z historických konštrukcií značne komplikované aj napriek faktu, že tento problém sa skúma už dlhšiu dobu [4]. Mnohokrát však nastáva problém v neodbornej realizácii sanačných zásahov. Pri tomto type sanácie sa väčšinou odstráni len dôsledok vlnutia z konštrukcie a nie príčina. To vedie k navýšeniu nákladov na opätovnú sanáciu z dôvodu potreby ďalších prác.

Takýmto problémom vo veľkej miere nahráva aj prísne chápanie Benátskej charty [5], ktorej nie vhodná interpretácia bráni častokrát v realizácii invazívnych technológií aplikácie dodatočných nepriepustných vrstiev na pamiatkovo chránených objektoch, ktoré sú podľa doteraz známych výskumov veľmi účinné, avšak pri ich realizácii dochádza k narušeniu integrity pôvodnej konštrukcie z dôvodu vytvorenia reznej škáry, čo pri nie vhodnom vyložení spomínanej Benátskej charty [5] nie je prípustné. Preto je potrebné zamerať pozornosť na výskum účinnosti metód, ktorých realizácia nenaruša pôvodnú integritu.

Otázkou ostáva, či neinvazívne technológie dokážu účinne bojovať a zmierniť v mnohých prípadoch veľmi vysokú hodnotu vlhkosti v týchto konštrukciách.

2 FUNGOVANIE A POPIS DOTERAJŠÍCH POZNATKOV

Bezdrôtové odvlhčovanie, nazývané tiež magnetokinetická metóda pracuje na princípe transformácie „voľnej, resp. kozmickej energie“ na energiu elektrickú, ktorá dokáže meniť polaritu molekúl vody a vytlačiť ju z konštrukcie na ktorú táto metóda pôsobí.

Toto elektrické pole spôsobuje takzvanú magnetickú kinézu a teda uvádza do pohybu nielen molekuly vody, ale napríklad aj soli, ktoré sú obsiahnuté vo vode. Pole vytvára prístroj, ktorý je umiestnený v interiéri sanovaného objektu a na rozdiel od iných zariadení tento prístroj nie je napájaný na bežný zdroj zo siete, ale funguje ako bolo vyššie uvedené na princípe využitia elektromagnetickej energie Zeme. Táto metóda podľa výrobcov nemá vplyv na živé organizmy a taktiež k jej výhodám patrí relatívne nízka cena. Publikácia [6] uvádza, že princíp premeny voľnej energie na elektrickú je vedcami spochybňovaný a táto metóda nebola dodnes jednoznačne preukázaná. Literatúra taktiež uvádza, že niektoré myšlienky fungovania prístrojov sú hypotetické a fungovanie nebolo vedecky objasnené.

Predmetom tohoto príspevku je zameranie sa na výskum neinvazívnej metódy určenej k odstráneniu vlhkosti z konštrukcií nazývanej magnetokinetická metóda, ktorej účinnosť je mnohými odborníkmi značne spochybňovaná. Práve z daného dôvodu je potrebné túto metódu hlbšie skúmať a pokúsiť sa vyvodiť výsledky, ktoré by dokázali potvrdiť, alebo vyvrátiť tvrdenia odbornej verejnosti.

Magnetokinetickú metódu a jej princíp opisuje publikácia [7], ktorá ju radí medzi elektrokinetické metódy, konkrétne do podskupiny ostatné metódy.

Túto technológiu taktiež opisuje aj publikácia [6], ktorá ju radí podľa stavebno-fyzikálneho a realizačného hľadiska do štvrtej skupiny nazvanej technológie využívajúce elektro-fyzikálne princípy. Táto publikácia taktiež spochybňuje predmetnú technológiu z hľadiska jej funkčnosti a opiera sa o ďalšie publikácie.

V roku 2002 opísal v článku [8] fungovanie tejto metódy. Závěry z tohto článku poukazujú na prípady nefunkčných systémov spomínanej firmy, avšak ďalej uvádzajú že tieto problémy boli spôsobené skôr zlou inštaláciou, resp. mechanickým poškodením systému počas jeho fungovania. Tieto závery nemožno hodnotiť ako relevantný dôkaz fungovania predmetného systému, nakoľko celý článok sa zaoberá iba teoretickou rovinou fungovania a nie je podložený žiadnym konkrétnym výskumom a ani výstupmi realizovanými či už v laboratórnych podmienkach alebo priamo v teréne.

Značne prínosný je taktiež článok [9], kde autor odkazuje na ďalších autorov a publikácie, ktoré poukazujú na nefunkčnosť, resp. nepreukázanú účinnosť týchto technológií. Autor cituje niektoré závery ako napríklad [10], kde sa spomína že daná norma sa vzťahuje na tie sanačné systémy, ktorých spôsob použitia a účinnosť sú vierohodne doložené a dlhodobo overené na objektoch v praxi. Taktiež [11] hodnotí postoj odborníkov k predmetnej technológii ako značne rezervovaný. V neposlednom rade odkazuje na publikáciu [12], ktorá v závere hodnotí, že na zmene vlhkového režimu skúmaného objektu sa podstatne viac prejavujú klimatické vplyvy, najmä zrážky, ako činnosť magnetického prístroja. Následne, na základe analýzy meraní neodporúča použitie magnetokinetických metód pre podivničené objekty. V závere horeuvedeného článku autor udáva, že tieto metódy nemožno zo strany odborníkov odporučiť do doby, než spoločnosti ponúkajúce tieto metódy nepredložia relevantné výsledky meraní, alebo vyjadrenia prestížnej, široko odbornou verejnosťou uznávanej vedeckovýskumnej organizácie, alebo technickej univerzity z ČR, resp. zahraničia, nakoľko predmetné metódy nie sú obsiahnuté ani v ČSN P 73 0610 a nie sú zaradené do sanačných metód v smerniciach WTA.

3 METODIKA

V rámci tohto výskumu boli realizované merania vlhkosti in situ na dvoch historických stavbách na západnom Slovensku. Nutne treba podotknúť, že dané merania stále prebiehajú a tento príspevok vychádza len z doterajších meraní, ktoré odrážajú čiastkové hodnoty vlhkosti a je predpoklad, že finálny výstup pozostávajúci z dlhodobého výskumu sa môže čiastočne zmeniť, avšak neočakáva sa výrazná zmena a teda možno tieto hodnoty považovať za smerodajné.

Metodika výskumu spočívala v získaní pôdorysu stavby pre zaznačenie miest merania, prvotnej obhliadke skúmaných objektov, nameraní miery zavlhnutia konštrukcií v interiérovej a taktiež exteriérovej časti objektu a spracovaní záznamu z tejto obhliadky a následnom meraní s dostatočným časovým odstupom pre overenie miery zavlhnutia.

Celý výskum je realizovaný in situ za pomoci vlhkomeru typu Testo 616, čo napomôže k získaniu reálnych hodnôt priamo z terénu.

4 VÝSLEDKY

Dňa 17.7.2020 bola vykonaná obhliadka prvého skúmaného objektu, kde je umiestnené približne od roku 2003 zariadenie zabráňujúce vlnutiu, ktoré pracuje na princípoch magnetokinézy. Pri obhliadke sa pristúpilo k niekoľkým posudzovacím meraniam na náhodne vybraných miestach, ktoré preukázali povrchovú vlhkosť konštrukcie v rozmedzí od 6,9% až do 15,6%. V niektorých miestach murivo vykazovalo len mierne zavlhčenie, čo však možno pripísať sanačným omietkam, ktoré sú aplikované na niektorých častiach objektu a bude nutný ďalší prieskum, ktorý upresní rozsah aplikovaných sanačných omietok v objekte.

Následne sa určil dátum prvého merania, na ktorom sa presne stanovili miesta, kde bude prebiehať pravidelný prieskum vlhkosti, čo zabezpečí objektívnosť porovnávaných hodnôt. Prvé merania v celom objekte prebehli 23. 7. 2020. Merania naznačujú značnú vlhkosť v niektorých prípadoch až zamokrenie stien objektu a tieto hodnoty sú uvedené v Tab. 1 a reprezentuje ich Obr. 1. Podmienky pri meraní uvádza Tab. 2. V miestach, kde možno s istotou konštatovať, že nebola použitá sanačná omietka vykazuje konštrukcia vlhkosť na povrchu hodnoty pohybujúce sa na úrovni 10% a viac, čo môže naznačovať nefunkčnosť systému. Vo viacerých miestach ako napríklad v bode P7 murivo vykazuje vysoké hodnoty aj vo výške cca 150 cm nad úrovňou podlahy. Vysoké hodnoty by mohli byť spôsobené kondenzáciou vodnej pary, avšak pri kontrolných meraniach vo výške cca 220 cm sa hodnoty vlhkosti pohybovali na úrovni 1,0%, čo podľa ČSN P 73 0610 [10] považujeme za suchú konštrukciu.

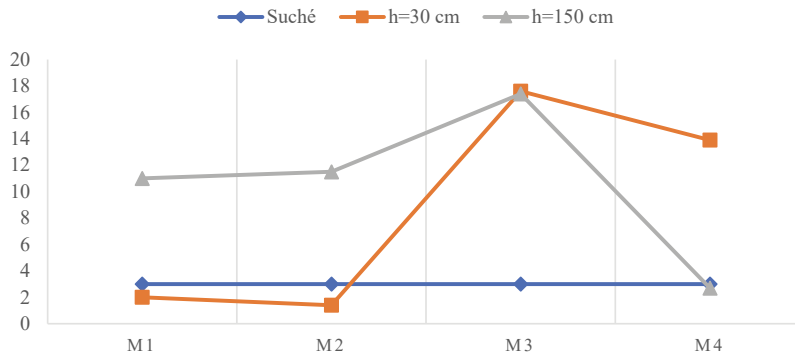
Tab. 1 Záznamy vybraných meraní vlhkosti.

Miest a mera ní	Výška merania od podlahy [cm]	Hmotnostná vlhkosť [%]	Výška merania od podlahy [cm]	Hmotnostná vlhkosť [%]	Pozn.
	dátum	23.7.'20		23.7.'20	
M1	30	9,7	150	0,9	
M2	30	11,2	150	1,2	
M3	50	14,3	150	12,2	h 2,2m = 1.1%
M4	30	14,7	150	7,4	
M5	30	16,4	150	1,0	

Tab. 2 Podmienky pri meraní vlhkosti.

Dátum merania	Tvzduchu [°C]	Φ [%]
23. 7. 2020	20,0	50,0

MERANIE VLHKOSTI OBJEKTU Č. 1 (30 A 150 CM NAD TERÉNOM)

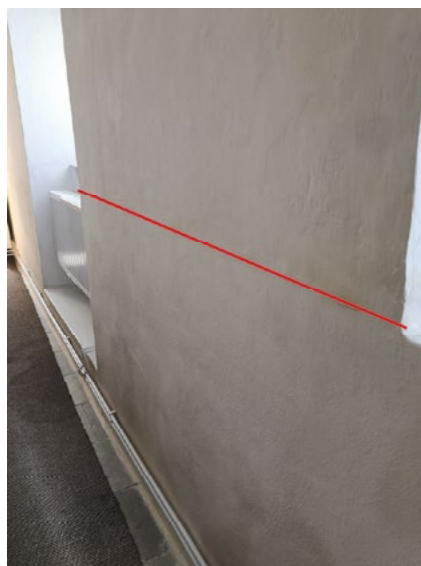


Obr. 1 Porovnanie jednotlivých meraní.

Druhý historický objekt podrobený výskumu sa taktiež nachádza na západnom Slovensku a predmetná technológia, resp. zariadenie zabraňujúce vlhnutiu pracujúce na princípoch magnetokinézy bolo v tejto stavbe zrealizované v roku 2005. Dňa 23. 7. 2020 bola vykonaná obhliadka Ev. kostola v Pezinku, kde je umiestnené od roku 2005 toto zariadenie zabraňujúce vlhnutiu. Z vizuálnej obhliadky bola zrejماً aplikácia sanačnej omietky na väčšine konštrukcie do výšky cca 130 cm.

Pri obhliadke sa pristúpilo k niekoľkým posudzovacím meraniam na náhodne vybraných miestach, kde pri meraní vlhkosti na povrchu sanačnej omietky vykazovala konštrukcia podľa ČSN len miernu vlhkosť alebo dokonca úplnú povrchovú suchosť a teda možno konštatovať, že daná omietka plní svoju funkciu, nad rovinou aplikácie sanačnej omietky vo výške cca 150 cm (Obr. 2) však hodnoty prekročovali úroveň 10 %, čo možno považovať za zamokrenie konštrukcie.

V niektorých miestach bola nameraná vlhkosť v hodnote 17,9 %, ktorá bola zároveň aj najvyššou nameranou hodnotou pri realizácii obhliadky. Z prvého prieskumu však možno odhadnúť, že konštrukcia objektu je značne zamokrená o čom svedčia aj namerané hodnoty uvedené v Tab. 3 a graficky uvedené v Obr. 3. Podmienky počas merania uvádza Tab. 4.



Obr. 2 Úroveň aplikácie sanačnej omietky.

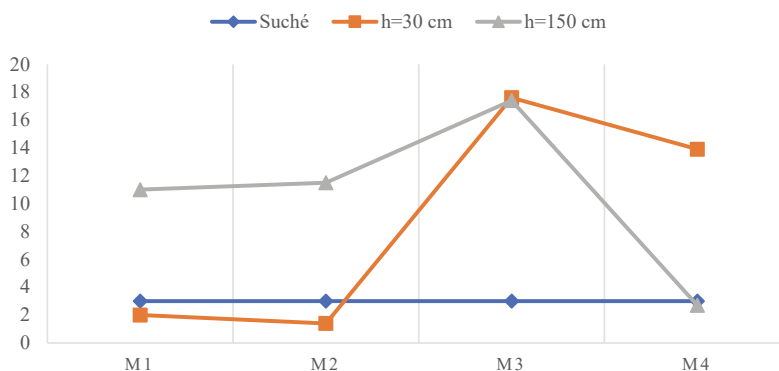
Tab. 3 Záznamy vybraných meraní vlhkosti.

Miest a meraní	Výška merania od podlahy [cm]	Hmotnostná vlhkosť [%]	Výška merania od podlahy [cm]	Hmotnostná vlhkosť [%]	Pozn.
	dátum	23.7.'20		23.7.'20	
M1	30	2,0	150	11,0	
M2	30	1,4	150	11,5	
M3	50	17,6	150	17,4	Bez sanač. om.
M4	30	13,9	150	2,7	Bez sanač. om.

Tab. 4 Podmienky pri meraní vlhkosti.

Dátum merania	Tvzduchu [°C]	Φ [%]
23. 7. 2020	21,0	50,0

MERANIE VLHKOSTI OBJEKTU Č. 2 (30 A 150 CM NAD TERÉNOM)



Obr. 3 Porovnanie jednotlivých meraní.

5 DISKUSIA

Z doposiaľ získaných hodnôt možno hodnotiť, že pochybnosti o skúmanej metóde majú svoje opodstatnenie, avšak treba podotknúť, že tento výskum je stále na svojom začiatku a je potrebné sa mu venovať podrobnejšie. Následne sa očakáva, že po rozsiahlejšom výskume bude možné stanoviť mieru funkčnosti týchto metód, ktorých fungovanie je z viacerých hľadísk spochybňované. Je však potrebné realizovať aj inú formu merania vlhkosti pre potvrdenie týchto výsledkov, nakoľko táto forma meraní môže byť taktiež spochybňovaná, avšak pri viacerých rôznych meraniach, či už gravimetrickou formou, alebo osadením vlhkomerných sond priamo do konštrukcie (tento výskum sa momentálne realizuje) by sa mali dosiahnuť vysoko objektívne výsledky.

6 ZÁVER

Ako je uvedené vyššie, doterajšie pozorovanie nasvedčujú iste nefunkčnosti skúmaných technológií, avšak pre stanovenie úplných a jasných záverov je potrebné zamerať sa na tento výskum z dlhodobého hľadiska. Z tohto dôvodu sú naplánované pravidelné prieskumné merania vlhkosti nie len na povrchu konštrukcie, ale taktiež je plánované osadenie sondy pre monitoring vlhkosti aj v konštrukcii. Tieto merania a jednotlivé hodnoty v nich budú prebiehať spočiatku v mesačných cykloch do doby, kedy bude možné konštatovať, že daná miera vlhkosti výrazne neklesá. Predpokladaná dĺžka meraní a zaznamenávania hodnôt v mesačných intervaloch je plánovaná na jeden rok, aby boli obsiahnuté všetky ročné obdobia a mohli sa posúdiť taktiež vplyvy jednotlivých ročných období na mieru zavlhnutia objektu, avšak pri výraznom kolísaní hodnôt zavlhnutia sa môže táto doba predĺžiť pre dosiahnutie čo najobjektívnejších výsledkov. Následne sa pristúpi k týmto meraniam vo väčších intervaloch, ktorých rozsah bude stanovený na základe analýz predchádzajúcich meraní. Tieto hodnoty sa následne porovnajú a taktiež sa zatriedia do skupín vlhkosti podľa ČSN P 73 0610. Z praxe možno konštatovať, že metódu možno považovať za účinnú, ak dokáže potlačiť mieru zavlhnutia pod hodnotu 5 %. Takýto výskum napomôže k objektívnemu vyhodnocovaniu výsledkov, ktoré budú pravidelne publikované a taktiež k stanoveniu jednotlivých záverov. Dlhodobý výskum napomôže k rozšíreniu poznatkov o technológii fungujúcej na princípe magnetokinézy a taktiež napomôže pri navrhovaní vhodných sanačných metódach pri obnove najmä historických objektov spojených vo veľkej miere s vysokou vlhkosťou.

Pod'akovanie

Táto publikácia bola vypracovaná v rámci výskumného projektu VEGA č. 1/0511/19 a Programu na podporu mladých výskumníkov 2020.

Použitá zdroje

- [1] M. P. Vitruvius, Deset knih o architektúre, Preložil Otoupalík, A., Praha: Svoboda, 1979.
- [2] E. Franzoni, Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge, *Construction and Building Materials*, 54 (2014) 123-136.
- [3] H. R. Kenwood, Dampness in and about houses. *Public Health*, 5 (1892) 247-250.
- [4] B. H. Vos, Suction of groundwater. *Studies in Conservation*. 16 (1971), 129-144.
- [5] The Venice Charter, *International Conservation and Restoration of Monuments and Sites*, (1964).
- [6] O. Makýš, *Technológia obnovy budov, Ochrana a oprava spodných a obalových konštrukcií*, Bratislava: SPEKTRUM STU, 2018.
- [7] EMERISDA "Summary report on existing methods against rising damp D2.1 FINAL version 31-07-2014"
- [8] J. Orbán, Mechanism of Aquapol Electromagnetic Wall Dehydration System, IS-APMEF 2002, Pollack Mihály Engineering Faculty, Pécs, Hungary, 2002.
- [9] T. Klečka, T.: Magnetokinetické metody sanace vlhkosti, (online) <https://stavba.tzb-info.cz/vlhkost-a-kondenzace-v-konstrukcich/2894-magnetokineticke-metody-sanace-vlhkosti> (20.09.2020).
- [10] ČSN P 73 0610: Hydroizolace staveb, Sanace vlhkého zdiva, Základní ustanovení.
- [11] M. Vlček, T. Klečka, K. Kolář, J. Kolísko, Sanace vlhkého zdiva, WTA CZ, 2000.
- [12] E. Burgetová, Závěry experimentálního ověřování účinnosti magnetokinetické sanační metody, 24. konference Sanace a rekonstrukce staveb 2002, Česká stavební společnost, WTA CZ, Praha 2002.
- [13] Witzany, J.: *Konstrukce pozemních staveb. Poruchy a rekonstrukce staveb. 2. díl*. Praha: ČVUT, 1995. ISBN 80-01-01310-3.
- [14] Balík, M.: *Vysušování zdiva 1*. Praha: Grada Publishing, 1999. ISBN 80-247-0438-2.
- [15] Balík, M.: *Vysušování zdiva 2*. Praha: Grada Publishing, 1997.
- [16] Balík, M.: *Vysušování zdiva 3*. Praha: Grada Publishing, 1999.

VNÍMÁNÍ MĚSTSKÝCH SCÉN A HODNOTA POHLEDU

PERCEPTION OF URBAN SCENES AND THE VALUE OF VIEW

Daniel Kliment^{*,1}

*daniel.kliment@usi.vutbr.cz

¹Ústav soudního inženýrství VUT v Brně, Purkyňova 464/118, 612 00 Brno

Abstrakt

Príspevek je zaměřen na zkoumání vztahu mezi cenami bydlení a vybranými charakteristikami životního prostředí, zejména dopad vnímání městských scén v blízkosti rezidenčních nemovitých věcí na cenu bydlení a představuje výsledky známých a již provedených studií. Zavedené charakteristiky vnímání městských scén jsou často kombinovány s jinými tradičními charakteristikami například v hedonickém cenovém modelu pro výpočet mezních cen, jinou alternativní metodou je použití expertního úsudku, například k hedonické analýze. Provedené studie vyvíjí a formují kvantifikační nástroje, které následně napomáhají osobám v rozhodovacích procesech, pochopit a analyzovat interakce mezi obyvateli a jednotlivými složkami městských scén a urbanismu.

Klíčová slova

Bydlení, hodnota pohledu, městská scéna, studie, životní prostředí

Abstract

The paper focuses on the study of the relationship between housing prices and selected environmental characteristics, the impact of the perception of urban scenes near residential real estate on the price of housing and presents the results of known and already performed studies. Introduced characteristics of urban scene perception are often combined with other traditional characteristics, for example in the hedonic pricing model for calculating marginal prices, another alternative method is to use expert judgment, for example for hedonic analysis. The performed studies develop and form quantification tools, which subsequently help people in decision-making processes to understand and analyze the interactions between residents and individual components of urban scenes and urbanism.

Key words

Housing, value of view, urban scene, study, environment

1 ÚVOD

Priorita prostorů v městském prostředí má nejen sílu integrující jednotlivé objekty do větších, vzájemně provázaných celků, ale také ovlivňovat ve stejném smyslu vztahy mezi lidmi, vzbuzuje pocit sounáležitosti, empatie. Z rozsáhlé množiny, kterou zahrnuje urbanismus, pokrývá architektura pouze tu pevnou, nemovitou, především nadzemní základnu města, kterou tvoří reliéf terénu s přírodními prvky a městská zástavba s prostory vnějšími i vnitřními. Syntetický vjem vytvářející celek v našem vědomí, představu o prostředí, v němž žijeme, které si sami vytváříme a které zpětně utváří nás. Význam kontextu v zástavbě potvrzuje i stále stoupající atraktivita historických měst, individualizovaná zástavba bez vzájemných vazeb není schopná vytvářet celky, dávající jakýkoli smysl. Kontext přestal být spjat výlučně s urbanismem historických měst, ale začal být chápán především jako nadčasová hodnota našeho životního prostředí. Všichni ze zkušenosti známe vliv prostředí a prostorů na náš psychický stav a vzájemné chování [1].

V příspěvku je věnována pozornost výhradně rešeršní činnosti řešené problematiky, ze které také vychází vymezení známé metodiky řešení a interpretace již dosažených výsledků. Motivem zpracování příspěvku bylo vědomí, že vliv vnímání rozdílných městských scén na hodnotu bydlení není primárně znám a není tak obecně uvažován při stanovení ceny bydlení, hlavně tedy pokud se jedná o Českou republiku.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED

Teorii zrakového vjemu se zabývá také tvarová psychologie zvaná gestaltismus, vychází z teze, že procesy, které probíhají ve smyslových orgánech, jsou v mysli organizovány na základě jednotných a strukturovaných konfigurací podle holistického principu, a sice že celek je něčím víc, než součtem svých částí [1].

Důležitým tématem urbanismu je vztah prostoru či hmotného prostředí k sociálním jevům a procesům, které se v něm odehrávají. Tendence humanizace architektury a lidských sídel, vychází mimo jiné z European Urban Charter. Jedná se o multidisciplinární obor spojující v sobě obor sociologii, architekturu a urbanismus. Optimalizace prostorových podmínek ovlivňuje koncepci architektury posledních let, ve vztahu k prostorovým podmínkám se setkáváme s pojmy, jako jsou topofilie a proximita. Topofilie vyjadřuje nedělitelnou výslednici vzájemného vztahu biologických, sociálních, kulturních a emocionálních faktorů ovlivňujících vztah jedince k jeho životnímu prostředí. Proximita naopak vyjadřuje vzájemnou vzdálenost a postavení v urbanizované struktuře [2].

V příspěvku, který publikoval Dimitris Damigos, Fotis Anyfantis je hodnota scénických pohledů spojených se zelenými plochami, mořským pobřežím, kulturními památkami atd. zkoumána očima realitních odborníků, kteří poskytují své odhady o atraktivitě každé krajiny a jejím vlivu na ceny bydlení. Jedná se o ilustraci alternativního a slibného přístupu z praktického hlediska, který je založen na technice odborného úsudku [3].

Hodnota pohledu

Tyrväinen a Miettinen ve Finsku zjistili, že ceny bydlení s výhledem do lesa mohou být o 4,9 % vyšší [4]. Podle McLeoda bylo zjištěno, že výhled na řeku v australském Perthu zvyšuje hodnotu nemovitých věcí o 28 %, což se samozřejmě snižuje s rostoucí vzdáleností k řece [5]. Graves a kolektiv v Kalifornii v USA uvedli ve svém výzkumu, že pohled na pláž zvyšuje hodnotu nemovité věci o 13 % [6]. Luttik v Nizozemsku odhadl, že rezidenční objekty s malebným výhledem na lesy v okolí by mohly přidat prémie 6 až 12 % a vodní útvary 8 až 10 % na jejich hodnotě [7]. Smith odhadl, že pohled na Michiganské jezero v Chicagu v USA přidává nemovitým věcem prémie 11 % v jejich ceně [8]. Bourassa a kolektiv odhadují, že v Aucklandu na Novém Zélandu je důležitý pohled na vodní prvek, protože prodejní cena objektů s tímto faktorem se zvyšuje přibližně o 10 %, kromě toho také zjistili, že nemovitě věci s panoramatickým výhledem na vodu přitahují prémie 65 % v očích kupujících [9]. Jim a Chen v čínském Guangzhou zjistili, že pohled na zelené plochy a blízkost vodních útvarů zvýšil cenu bydlení o 7,1 %, respektive 13,2 %. Jim a Chen dále odhadují, že panoramatický pohled na přístav v Hongkongu by mohl zvýšit hodnotu bytů o 3,0 %. Zajímavé je, že navzdory očekávání autorů by panoramatický výhled na hory mohl snížit cenu bytů o 6,7 %, což odráží preference kupujících vůči bytům s výhledem na moře [10], [11]. Obecně se ukázalo, že atraktivní typy krajiny způsobují prémie 5 až 12 % v ceně nemovitých věcí oproti méně atraktivnímu prostředí v jejich okolí. Téměř všechny uvedené studie zabývající se oceňováním pohledu na cenu bydlení byly prováděny pomocí hedonických modelů.

Pokud jde o hedonický přístup, v literatuře se uvádí, že je třeba zvážit několik otázek. Měla by se například shromažďovat rozsáhlá data, aby se zachytil vliv kvality životního prostředí na trh s bydlením, což je stejně jako ostatní primární metody oceňování obecně časově náročný a nákladný proces. Kromě toho se uvádí, že formu hedonického modelu nelze specifikovat z čistě teoretických důvodů a musí být stanovena empiricky. Výsledky tedy mohou být vysoce citlivé na specifikaci modelu a úroveň disagregace [4].

3 METODIKA

Metoda HPM

Metoda hedonické ceny (Hedonic price/pricing method – HPM) je založena na spotřebitelské teorii, která odvozuje hodnotu některých statků od celého souboru cenných vlastností, které tyto statky charakterizují, přičemž některé z těchto vlastností mohou být environmentální. Tyto statky nazýváme diferencovanými statky. Jsou to takové statky, které spotřebitel chápe jako součást určité skupiny produktů, ale mezi jednotlivými konkrétními statky z této skupiny a jejich vlastnostmi mohou být velké rozdíly. [12] Hedonická cena se snaží informace o hodnotě těchto environmentálních atributů odvodit z tržní ceny celého statku a používá přitom informace z existujícího trhu s nemovitými věcmi. Obecný model funkce hedonické ceny (hedonic price function) můžeme charakterizovat tak, že cena P diferencovaného statku je vysvětlována vektorem vlastností z , které statek charakterizují. Zafixováním úrovně všech ostatních vlastností jsme schopni se zaměřit pouze na vztah ceny a environmentálního atributu, který zkoumáme [13], [14].

Metoda PSPNet

Metoda zaměřující se na důležité prvky městských scén. Prvek scény je definován jako procento pixelů přidružené ke konkrétnímu prvku k celkovému počtu pixelů v panoramatickém zobrazení městské scény. Procento představuje procento vizuálního prvku v zorném poli osoby neboli pozorovatele, proto obecný vzorec lze napsat:

$$VI_{obj} = \frac{\sum_{i=1}^n PIXEL_{obj}}{\sum_{i=1}^m PIXEL_{obj}} \times 100 \%, obj \in \{zeleň, budova, obloha\} \quad (1)$$

kde VI_{obj} je ... procento vizuálního prvku v panoramatickém pohledu a $\sum_{i=1}^m PIXEL_{obj}$ je ... počet pixelů přidružených k vizuálnímu prvku objektu.

Analýza scény zahrnuje rozpoznávání a klasifikaci objektů ve skupině panoramatických pohledů na úrovni městských scén, které zastupují ulice. Metoda PSPNet používá modul sdružování pyramid, aby nabídl další kontextové informace ke snížení pravděpodobnosti falešné segmentace; proto vykazuje výhody při analýze komplikovaných scén s různými vizuálními prvky [15].

Metoda Fuzzy Delphi

Metoda Fuzzy Delphi je analytická technika, která je založena na metodě Delphi a Fuzzy Theory. Delphi metoda byla vyvinuta v 50. a 60. letech ve společnosti RAND Corporation v Santa Monice v Kalifornii a je možná neznámější technikou skupinového úsudku, poskytuje smysluplné odhady pro širokou škálu složitých problémů a je platným nástrojem pro předpovídání a podporu rozhodování. Přístup Fuzzy Delphi se řídí stejnými kroky jako tradiční metoda Delphi, ale místo použití ostrých čísel používá fuzzy čísla v kontextu teorie Fuzzy. Fuzzy množiny jsou rozšířením klasické teorie množin a jsou charakterizovány funkcí stupně členství, která mapuje členy do jednotkového intervalu $[0,1]$. Hodnota 0 znamená, že člen není zahrnut v dané sadě, 1 popisuje plně zahrnutý člen, proto je U fuzzy množina A definována jako [16]:

$$A = \{x, \mu_A(x) | x \in A, \mu_A(x) \in [0, 1]\} \quad (2)$$

kde $\mu_A(x)$ je ... funkce stupně členství $\mu: x \rightarrow [0, 1]$.

V prvním kroku poskytují dotazování odborníci své odhady, data jsou reprezentovány ve formě trojúhelníkových čísel:

$$A_i = (\alpha_1^{(i)}, \alpha_M^{(i)}, \alpha_2^{(i)}), \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

kde $\alpha_1^{(i)}$ je ... stanovení minima, $\alpha_M^{(i)}$ je ... stanovení nejpravděpodobnější hodnoty a $\alpha_2^{(i)}$ je ... stanovení maxima.

V dalším kroku se určí průměr z odhadů všech odborníků podle vztahu:

$$A_{ave} = (m_1, m_M, m_2) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_1^{(i)}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_M^{(i)}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_2^{(i)} \right) \quad (4)$$

kde $A_{ave} = (m_1, m_M, m_2)$ je ... Fuzzy průměr všech A_i odhadů.

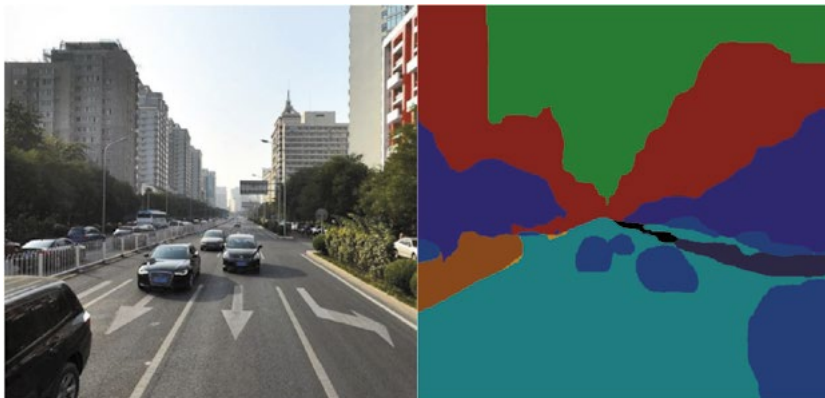
Posledním krokem je určení odchylky trojúhelníkových čísel:

$$A_{ave} - A_i = (m_1 - \alpha_1^{(i)}, m_M - \alpha_M^{(i)}, m_2 - \alpha_2^{(i)}) \\ = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_1^{(i)} - \alpha_1^{(i)}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_M^{(i)} - \alpha_M^{(i)}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_2^{(i)} - \alpha_2^{(i)} \right) \quad (5)$$

4 VÝSLEDKY

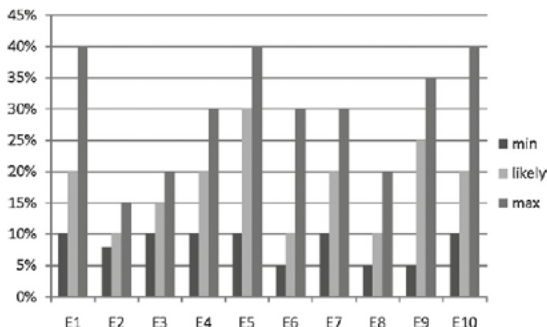
Studie, zkoumající ovlivnění vnímání scény na úrovni ulic ve vztahu k cenám bydlení v čínských velkoměstech, zabývající se metodou PSPNet, zaměřující se na důležité prvky městských scén prokázala, že každé 1 % zvýšení indexu zeleně v panoramatickém pohledu bylo spojeno s 0,2273 % zvýšením ceny bydlení a každé 1 % zvýšení indexu oblohy v panoramatickém zobrazení bylo spojeno s nárůstem průměrné ceny bydlení na úrovni pozemku o 0,0899 %. Při porovnání indexu zeleně a oblohy v panoramatickém pohledu ve dvou čínských velkoměstech bylo zjištěno, že obyvatelé Pekingu projeví větší ochotu platit za tyto vizuální prvky než obyvatelé Šanghaje.

Ve výzkum byla použita nejmodernější metodu PSPNet zpracovávající masivní panoramata pouličních pohledů pro kvantifikaci pohledů na zeleň, budovy a oblohu, pak byly tyto indikátory poprvé zavedeny do HPM.



Obr. 1 Příklad sémantické segmentace panoramatického pohledu vnímání městské scény metodou PSPNet [15].

Studie zabývající se metodou Fuzzy Delphi dospěla k závěru, že hodnota vlastnosti se zvyšuje v sestupném pořadí podle důležitosti následovně: pohled na významné památky, výhled na moře, pohled do městských parků, pohled z výškových bytů a pohled do řídké osídlených oblastí. Na druhé straně negativní ovlivnění, tedy že hodnota vlastností se snižuje s výhledem na hřbitov a neřízenou skládku. Všichni odborníci se shodli, že pohled hraje významnou roli v hodnotě nemovité věci.



Obr. 2 Znázornění procentuálního rozdílu (minimálního, pravděpodobného a maximálního) v tržní ceně dvou identických bytů s rozdílným výhledem, konkrétně do městské zeleně a do zastavěného prostředí [16].

Obecně podle výsledků průzkumu z Athén, se hodnota dvou identických nemovitých věcí umístěných ve stejném okrese mohla podle zjištění a jejich závěru lišit mezi 5 % a 45 %, nejpravděpodobněji asi 15 %. Pokud jde o vliv specifických environmentálních a člověkem vytvořených prvků, ve srovnání s typickým pohledem na byt v hustě osídlené čtvrti Atén přitahují nemovitosti s výhledem na památky Akropole nejvyšší prémii v ceně, dosahující pravděpodobně až 46 %. Působení moře je také významné, vzhledem k tomu, že v průměru zvyšuje cenu obydlí o 34 %, zatímco městský park zvyšuje cenu domu o 18 %. Pozitivní byl také pohled z výškové bytů a do parků (konkrétně mezi 14 % a 19 %). Na druhé straně, pohled na nekontrolované skládky a průmyslová zařízení snižuje ceny bydlení o 23 %, respektive o 21 %. Bylo také prokázáno, že opuštěné lomy a hřbitovy mají silný negativní vliv (konkrétně 15 %, respektive 12 %) [16].

5 DISKUZE

Městské vnímání úzce souvisí s vybavením městského vizuálního prostředí a empirické výsledky výzkumů prokázaly, že prvky vnímání na úrovni městských scén mohou významně zvýšit, případně snížit cenu bydlení.

Dále byla ověřena významnost zeleně a otevřenost oblohy kolem sídlišť jako potenciální environmentální vybavenost, za kterou byli kupující ochotni platit, a měla by být považována za implicitní faktor uvažovaný v modelech HPM. Studie aplikující výše zmíněné metody pomáhají vyvinout kvantifikační nástroje, které pomohou osobám s rozhodovací pravomocí a osobám zaměřeným na plánování pochopit a analyzovat interakci mezi obyvateli a složkami městských scén.

6 ZÁVĚR

Zjištění provedených studií obvykle nelze zobecnit na všechny trhy s bydlením. Prostorová závislost může způsobit různé výsledky, proto je potřebné aplikovat zmíněné metody na každou lokalitu, zejména kulturně odlišnou krajinu, samostatně. Důležité je také si uvědomit, že prostorová autokorelace má větší dopad na odhady koeficientů charakteristik specifických pro projekt a umístění než odhady charakteristik specifických pro jednotku.

Studium výsledků provedených a již aplikovaných výzkumů mě utvrdila v názoru, že nelze opomíjet vnímání městských scén a hodnotu pohledu, protože je velké množství kupujících, kteří si těchto statků cení a uvědomují si, že mají nějakou hodnotu a jsou evidentně ochotni za něj platit. Dalším krokem souvisejícím se zpracováním tohoto příspěvku bude aplikace zmíněných metod a provedení podobného výzkumu pro naši krajinu, konkrétně Českou republiku.

Poděkování

Příspěvek byl zpracován za podpory Specifického vysokoškolského výzkumu MŠMT č.j. ÚSI-J-20-6390.

Použité zdroje

- [1] Švábová, M. Priorita prostoru - kontext, Asociace pro ochranu a rozvoj kulturního dědictví ČR [online]. Copyright © 2020 [cit. 01.11.2020]. Dostupné z: <http://www.asorkd.cz/>
- [2] Schmeidler, K. Sociologie v architektonické a urbanistické tvorbě, Ing. Novotný, Brno, 1997, druhé vydání 2001, ISBN 80-238-6582-X
- [3] Damigos, Dimitris. (2011). The value of view through the eyes of real estate experts: A Fuzzy Delphi Approach. *Landscape and Urban Planning*. 101. 171-178. 10.1016/j.landurbplan.2011.02.009
- [4] Tyrväinen, L., Miettinen, A., 2000. Property prices and urban forest amenities. *J. Environ. Econ. Manag.* 39, 205–233.
- [5] McLeod, P.B., 1984. The demand for local amenity: an hedonic price analysis. *Environ. Plann. A* 16, 389–400.
- [6] Graves, P., Murdoch, J.C., Thayer, M.A., Waldman, D., 1988. The robustness of hedonic price estimation: urban air quality. *Land Econ.* 64, 220–233.
- [7] Luttk, J., 2000. The value of trees, water and open space as reflected by house prices in the Netherlands. *Landscape Urban Plan.* 48, 161–167.
- [8] Smith, B.H., 1994. Coastal setback and the impact of water amenities. *Geogr. Anal.* 26, 364–369.
- [9] Bourassa, S.C., Hoesli, M., Peng, V.S., 2003. Do housing submarkets really matter? *J. Hous. Econ.* 12, 12–28.
- [10] Jim, C.Y., Chen, W.Y., 2006. Impacts of urban environmental elements on residential housing prices in Guangzhou (China). *Landscape Urban Plan.* 78, 422–434.
- [11] Jim, C.Y., Chen, W.Y., 2009. Value of scenic views: hedonic assessment of private housing in Hong Kong. *Landscape Urban Plan.* 91, 226–234.
- [12] Kolstad, Charles D. (2000): *Environmental economics*, New York, Oxford University Press.
- [13] Van Den Bergh, C. J. M. Jeroen (1999): *Handbook of Environmental and Resource Economics*, Great Britain, Edward Elgar Publishing.
- [14] Markandya, A., P. Harou, L.G. Bellù et V. Cistulli (2002): *Environmental Economics for Sustainable Growth a handbook for practitioners*, Great Britain, Edward Elgar Publishing.
- [15] Fu X, Jia T, Zhang X, Li S, Zhang Y (2019) Do street-level scene perceptions affect housing prices in Chinese megacities? An analysis using open access datasets and deep learning. *PLOS ONE* 14(5): e0217505. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217505>
- [16] Damigos, Dimitris. (2011). The value of view through the eyes of real estate experts: A Fuzzy Delphi Approach. *Landscape and Urban Planning*. 101. 171-178. 10.1016/j.landurbplan.2011.02.009.

TRANSFORMACE PROSTOROVÝCH DAT PRO POTŘEBY SIMULACE PĚŠÍCH

SPATIAL DATA TRANSFORMATION FOR PEDESTRIAN SIMULATION

Jan Brožek*,¹

*156654@vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95

Abstrakt

Cílem projektu bylo vytvoření skriptu pro transformaci prostorových dat z obecných souřadnic do formátu v prostředí simulačního nástroje Pathfinder. Alternativou k běžné praxi, kdy je importovaný vektorový model upravován přímo v rozhraní simulačního nástroje, což je při rozsáhlém modelu velmi časově náročné, je simulaci spustit pomocí příkazového řádku, jehož vstupem je textový soubor se specificky formátovanými daty.

Vstupní prostorová data jsou upravena pomocí skriptu v programovacím jazyce R s pomocí softwaru QGIS a tím dosažena jistá míra automatizace transformace a tím zkrácení doby potřebné pro zpracování i velmi rozsáhlých modelů.

Výsledkem je upravený textový soubor, který je připraven na provedení simulace pomocí příkazového řádku.

Klíčová slova

Simulace, skript, Pathfinder, programovací jazyk R

Abstract

The aim of the project was to create a script for the transformation of spatial data from general coordinates into a format in the environment of the simulation software Pathfinder. An alternative to the common practice, where the imported vector model is edited directly in the simulation tool interface, is to run the simulation using a command line, the input of which is a text file with specifically formatted data.

The input spatial data are modified using a script in the R programming language with the help of QGIS software, thus achieving a certain degree of transformation automation and thus reducing the time required for processing even very large-scale models.

The result is a modified text file that is ready to perform a simulation using the command line.

Key words

Simulation, script, Pathfinder, R programming language

1 ÚVOD

Pathfinder je analytický nástroj, který je používán pro simulaci evakuace osob nejčastěji z budov, nebo k prosté simulaci jejich pohybu. Prostředí tohoto nástroje se skládá ze tří modulů - tvorba modelu, simulace a 3D vizualizace.

Škála možných vstupních typů souborů pro import geometrie do modelačního prostředí Pathfinderu je omezena na pár typů souborů, ze kterých je nutno manuálně extrahovat jednotlivé prvky modelu potřebné pro simulaci.

Tuto pracnost je možno snížit a zároveň lze rozšířit škálu použitelných vstupních typů při použití příkazového řádku, který je vyvolán pomocí souboru "testsim.bat". Ten je součástí instalačního balíčku softwaru Pathfinder.

Cílem bylo ověřit možnost tvorby geometrie alternativní metodou pomocí skriptu v jazyce R [2] z importovaných obecných souřadnic.

Tvorba skriptu byla testována na modelu malého rozsahu s použitím základních prvků a následnou kontrolou spuštěním takto vytvořeného textového souboru pomocí příkazového řádku.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Tvorba rozsáhlých modelů je problematická vzhledem k její časové náročnosti. Běžná praxe při sestavování modelu v prostředí simulačního nástroje Pathfinder je import geometrie do prostředí, nejčastěji ve formátu dwg. Z této geometrie se poté pomocí funkce vytvoří vlastní síť, na které probíhá příslušná simulace. Právě zde, pokud je model rozsáhlý, nabývá čas potřebný na zpracování modelu, jelikož tato funkce neumožňuje tvorbu prvků (místností) hromadně, ale pouze jednotlivě. Uživatel je tedy nucen místnosti vybrat postupně.

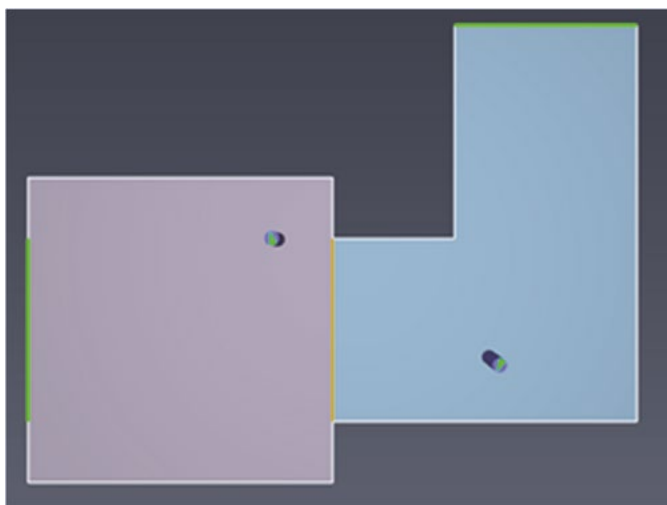
Nadějným nástrojem na úsporu času je právě možnost spustit simulaci přes příkazový řádek a tím obejít vlastní modelační prostředí Pathfinderu. Textový soubor pro vstup do tohoto nástroje však musí mít data uspořádána ve specifickém formátu. Tento formát může být z prostředí Pathfinderu exportován pomocí funkce *Save simulator input*. V tomto souboru je potom geometrie rozdělena do sedmi základních částí:

- floors - seznam podlaží s názvem a výškovou úrovní;
- nodes - seznam místností a dveří;
- verts - seznam bodů se souřadnicemi X, Y a Z;
- stairs - seznam schodišť (v případě vícepatrového modelu);
- doors - seznam dveří;
- edges - seznam hran (stěna nebo dveře)
- navmesh - seznam prvků trojúhelníkové sítě, která vytváří plochu pro pohyb osob.

Možnost uložení tohoto textového souboru je primárně určena pro situace, kdy je potřeba například změnit úhel pohledů nebo trasu přeletu nad modelem, ale je ho možné modifikovat a tím i kompletně změnit tvar modelu [1].

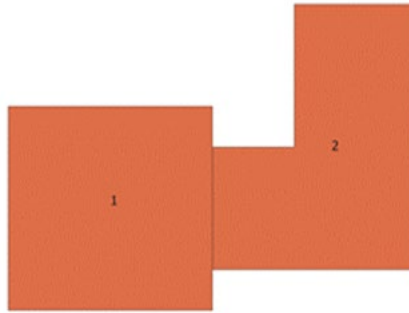
3 METODIKA

Pro testování skriptu na transformaci souřadnic byl vytvořen jednoduchý model v softwaru Pathfinderu, který obsahuje základní prvky a následně byl exportován jako textový soubor (simulator input).



Obr. 1 Podoba jednoduchého modelu pro testování skriptu.

Úkolem bylo replikovat tuto podobu za použití jiných druhů vstupních formátů. Pro snadnou vizualizaci byl tentýž model vytvořen v softwaru QGIS [3]. Odtud je možné vytvořenou geometrii exportovat jako soubor typu csv s označením a souřadnicemi geometrických prvků. (viz Obr. 2). Z této geometrie lze také získat všechny potřebné polohové definované prvky s manuálním přidáním atributu, zda se jedná o stěnu (boundary) nebo dveře (door / exit_door).



Obr. 2 Identická geometrie vytvořená v softwaru QGIS tvořena dvěma polygony.

Pro proveditelnou transformaci byl vstupní soubor typu csv (viz Tab. 1) navržen tak, aby obsahoval všechny potřebné informace. Podkladem pro tento formát byl export geometrie z QGIS a tedy pouhým spojením exportovaných souborů je možné docílit tohoto výsledku.

Tab. 1 Kompletní seznam prvků a atributů potřebných pro tvorbu geometrie.

shape_id	x	y	z	room_id	edge_type	shape_id	x	y	z	room_id	edge_type
0	0	0	0	1	boundary	7	10	0	0	1	boundary
0	0	2	0	1	boundary	7	0	0	0	1	boundary
1	0	2	0	1	exit_door	8	10	2	0	2	exit_door
1	0	8	0	1	exit_door	8	10	8	0	2	exit_door
2	0	8	0	1	boundary	9	10	8	0	2	boundary
2	0	10	0	1	boundary	9	14	8	0	2	boundary
3	0	10	0	1	boundary	10	14	8	0	2	boundary
3	10	10	0	1	boundary	10	14	15	0	2	boundary
4	10	10	0	1	boundary	11	14	15	0	2	boundary
4	10	8	0	1	boundary	11	20	15	0	2	boundary
5	10	8	0	1	door	12	20	15	0	2	door
5	10	2	0	1	door	12	20	2	0	2	door
6	10	2	0	1	boundary	13	20	2	0	2	boundary
6	10	0	0	1	boundary	13	10	2	0	2	boundary

Kde *shape_id* je pořadové číslo hrany, která je definovaná pomocí souřadnice X, Y a Z počátečního a koncového bodu. Souřadnice Z není v tomto případě podstatná, jelikož se jedná o model s pouze jedním podlažím. Položka *room_id* značí příslušnost dané hrany k určité místnosti a nakonec ve sloupci *edge_type* je uveden typ hrany - zeď (boundary), dveře (door), které jsou mezi dvěma místnostmi, nebo východové dveře (exit_door), které jsou únikovými východy z modelu.

Tvorba skriptu

Kompletní transformace proběhla v nástroji Rstudio a QGIS, což jsou oba tzv. otevřené softwary (open-source software) a jsou tedy bezplatné a volně dostupné.

První skupinou pro zpracování je část *nodes* (Obr. 3), tedy vytvoření seznamu místností a dveří, kde vytvořený skript vyjme všechny unikátní hodnoty z čísel místností a podle parametru typu hrany nalezne dveře a vše naformátuje do potřebné podoby.

```
[nodes]
0: "Room1" 0, -1
1: "Room2" 1, -1
2: "Door2" -1, -1
```

Obr. 3 Ukázka výsledného formátování této sekce, kde v první části je id daného prvku, následuje pojmenování a v poslední části jsou výchozí hodnoty, které jsou pro tento jednoduchý model ponechány.

Podle souřadnic dále vrátí seznam vrcholů pro sekci *verts* (Obr. 4) a eliminuje duplicitní záznamy.

[verts]			
0:	0	0	0
1:	0	2	0
2:	0	8	0

Obr. 4 První tři vrcholy seznamu vrcholů, kde nalevo je id vrcholu a dále souřadnice x, y a z.

Seznam dveří je získán podle uvedeného typu hrany. V této sekci *doors* (Obr. 5) je seznam doplněn o příslušnost k místnosti, v případě východových dveří, resp. k místnostem, v případě dveří mezi místnostmi. K získání této informace je potřeba mít ve vstupních datech záznam o těchto dveřích pro každou místnost, tedy 2×. Dále je pomocí skriptu dopočítána jejich šíře.

[doors]						
0:	2	6	0	-	-	-
1:	3	6	0	1	-	-
2:	4	6	1	-	-	-

Obr. 5 Kompletní seznam dveří, kde na začátku je id dveří, první číslo za dvojtečkou je id ze sekce nodes, následuje šířka dveří v metrech, a nakonec příslušnost k místnostem, jejichž id je také definováno v sekci nodes.

Následuje sekce *edges* (Obr. 6) - seznam hran, kde je uvedeno, o jaký typ hrany se jedná a kterými body, očíslovaných v sekci *verts*, je daná hrana definována.

[edges]			
0:	boundary	0	1
1:	exit_door	2	1 2
2:	boundary	2	3
3:	boundary	3	4
4:	boundary	4	5
5:	door	3	5 6

Obr. 6 Ukázka seznamu hran použitých v modelu. V prvním sloupci je id hrany, následuje její typ. Pokud se jedná o dveře, tak v následujícím sloupci je id ze sekce nodes. Zakončeno je to dvojicí id reprezentující vrcholy.

Poslední, a na tvorbu skriptu nejsložitější sekci, je *navmesh* (Obr. 8) - seznam prvků trojúhelníkové sítě. Příkaz na vytvoření sítě pomocí tzv. Delaunayovy triangulace z bodů sice existuje [4], ale pro tento případ tvorby geometrie je nevhodný kvůli možné komplexnosti modelu. Problém nastává v případech, kdy požadujeme výběr pouze některých prvků trojúhelníkové sítě.

Řešení nabízí software QGIS, kde je možno podle lokace vybrat relevantní prvky sítě.



Obr. 7 Vytvořená síť pomocí Delaunayovy triangulace, kde zeleně jsou označeny relevantní prvky modelu a červeně prvky mimo model, které je potřeba vyselektovat.

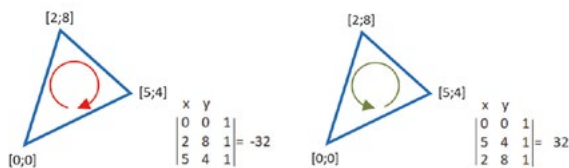
Exportem těchto vybraných prvků včetně jejich atributů a souřadnic bodů trojúhelníků dostaneme seznam se všemi hodnotami, které jsou pro transformaci potřeba.

Trojúhelníková síť je zde zapsána jako seznam jednotlivých trojúhelníků s trojicí vrcholů, ze kterých je složen.

[navmesh]				
0:	0	open	1	6 5
1:	0	open	1	5 2
2:	0	open	0	7 6

Obr. 8 Ukázka formátování v sekci navmesh. V prvním sloupci je id prvku sítě, následuje "0" a "open", což jsou výchozí hodnoty, které jsou pro tento model konstantní. Poslední je sekvence tří id, které odkazují na body, ze kterých je daný trojúhelník vytvořen.

Ukázalo se, že pořadí vrcholů zde nemůže být libovolné, nýbrž musí být seřazeny tak, aby tvořily levotočivý systém. Testování, zda je sekvence bodů levotočivá či pravotočivá, je provedeno pomocí výpočtu determinantu matice tvořené souřadnicemi bodů doplněná o sloupec jedniček (Obr. 9). Pokud je determinant matice větší jak 0, jedná se o systém levotočivý, pokud je naopak menší než 0, jedná se systém pravotočivý. Pomocí této logiky lze ve skriptu pořadí vrcholů otestovat. Vyjde-li determinant záporný, je nutné prohodit druhý a třetí bod v dané trojici. Tím je zaručeno, že upravené pořadí vrcholů bude mít správnou orientaci.



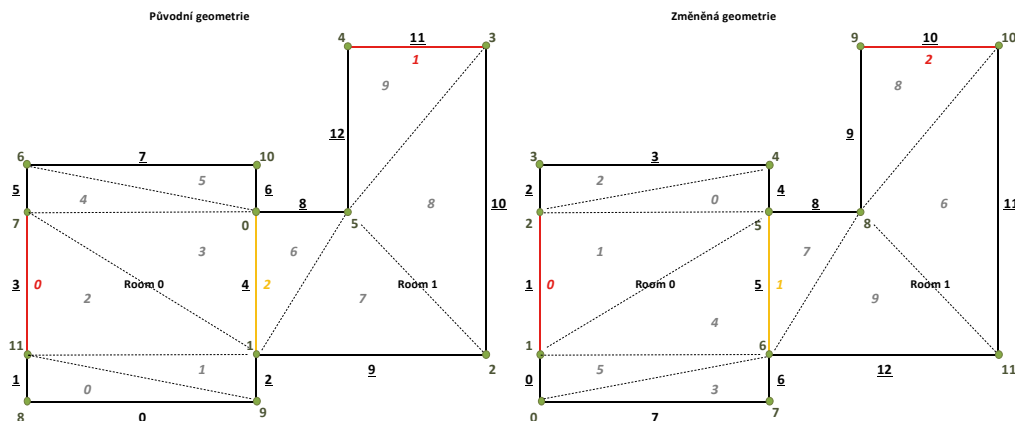
Obr. 9 Schéma logiky při určování orientace sekvence bodů.

Jelikož účelem bylo ověřit možnosti využití pouze geometrie, tak zbylé údaje o obsazenosti modelu lidmi byly převzaty z modelu původního.

Nahrazením zmíněných částí je textový soubor připraven pro spuštění simulace.

4 VÝSLEDKY

Tvorbou geometrie v textovém souboru za použití skriptu sice nedosáhneme zcela identického uspořádání prvků, ale na funkčnost modelu to nemá vliv. Jak je vidět na Obr. 10 pořadí vrcholů, hran či trojúhelníků sítě je zcela jiné oproti originálu.



Obr. 10 Srovnání uspořádání původní geometrie a stejné geometrie vytvořené pomocí skriptu, kde zeleně jsou vyznačeny čísla bodů, podtržená čísla jsou značením pro hrany, červeně/žlutě – označení dveří a šedě jsou očíslovány trojúhelníky navigační sítě.

5 DISKUZE

Transformace prostorových dat do prostředí Pathfinderu je prvním krokem k teoretické celkové automatizaci procesu tvorby modelu pro simulaci pohybu pěších. Skript, který tento převod provádí byl sice testován jen na geometrii malého rozsahu, ale nic nebrání tomu, aby byl použit i pro velké územní celky, kde je ruční tvorba velmi obtížně realizovatelná.

Vzhledem k tomu, že je při transformaci využito gis prostředí, stává se limitujícím faktorem skutečnost, že požadovaná geometrie musí být v jedné výškové úrovni, tedy jednopodlažní. Ve skriptu zatím nejsou zahrnuty spojovací články mezi podlažními, jako jsou schodiště nebo výtahy.

Skript je však možné dále modifikovat a rozšiřovat a tím expandovat jeho použití na komplexnější modely.

6 ZÁVĚR

Tato alternativní metoda, jak pracovat se simulačním nástrojem Pathfinder, se jeví jako možná při tvorbě prostorové geometrie a úsporná z časového hlediska. Jakmile je vytvořen skript v jazyku R, tak transformace je značně zautomatizována a časová náročnost zpracování menšího vs. rozsáhlého modelu závisí pouze na výkonu výpočetního zařízení.

Dalšími kroky pro rozvoj této metody může být implementace obsazení modelu osobami, nebo přidání dalších možností a nastavení, které jsou běžně dostupné v modelovém prostředí Pathfinderu. Script tedy může být snadno upraven i za použití jednodušších operací v jazyku R a softwaru QGIS.

Použitá zdroje

- [1] PATHFINDER User manual. 2020-4 version. [online]. Thunderhead Engineering Consultants [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: <https://files.thunderheadeng.com/support/documents/pathfinder-user-manual-2020-4.pdf>
- [2] R studio [online]. 2020 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: <https://rstudio.com>
- [3] QGIS [online]. 2020 [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: <https://qgis.org/en/site/>
- [4] MILFELDT, Mathias. Package 'triangulation' [online]. [cit. 2020-11-8]. Dostupné z: <https://cran.r-project.org/web/packages/triangulation/triangulation.pdf>
- [5] Stackoverflow [online]. 2020 [cit. 2020-11-1]. Dostupné z: <https://stackoverflow.com>
- [6] StackExchange [online]. 2020 [cit. 2020-11-1]. Dostupné z: <https://stackexchange.com>

ANALÝZA POHYBU A STACIONÁRNÍCH AKTIVIT V PROFILU MĚSTSKÉ TŘÍDY

AN ANALYSIS OF THE MOVEMENT AND STATIONARY ACTIVITIES IN A CITY BOULEVARD PROFILE

Jan Tichý¹, Tomáš Pavlovský¹

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Cílem práce bylo analyzovat a kvantifikovat dopady rozsáhlé rekonstrukce tramvajové trati na funkci městské třídy (ulice Veveří v Brně), a to zejména na cílové aktivity obyvatel. Byly analyzovány vzorce prostorového chování osob a vybrané relevantní ukazatele komerčních provozoven. Na základě sady šestnácti časových vzorků v sedlových a špičkových časech byl prokázán značný negativní dopad stavby na fakultativní aktivity v prostoru ulice a nárůst její transitní funkce. Negativní dopad byl potvrzen ověřovací studií komerčních provozoven, zejména jejich návštěvnosti a tržeb.

Klíčová slova

Analýza pohybu, městská třída, stacionární aktivity, rekonstrukce, ulice Veveří

Abstract

The goal of the project was an analysis and quantification of the impacts of a large-scale tram track reconstruction on the function of a city boulevard (Veveří st. in Brno), with the focus on the residential target activities. Spatial behaviour patterns and selected relevant indexes of commercial establishments were analysed. A significant negative impact of the reconstruction on the voluntary activities in the boulevard space and an increase in its transit function was proven based on sixteen representative time frames. This negative impact was confirmed by a validation study focusing on visitor turnout and revenues of commercial establishments.

Key words

Movement analysis, city boulevard, stationary activities, reconstruction, Veveří street

1 ÚVOD

Prostorové chování osob ve veřejném prostoru je dlouhodobě sledovanou veličinou v oborech urbanismu i sociální geografie. Zatímco sociální geografie analyzuje chování především na úrovni makrostruktury sídel, v rámci takzvaných prizmat, urbanismus se věnuje spíše analýze pohybu osob v mikrostrukturách konkrétních řešených ploch. V obou případech jsou však spíše řešeny vzorce chování dlouhodobé, standardizované. V tomto ohledu nabízí pole pro možné zkoumání časově a prostorově specificky omezených schémat.

Práce analyzuje dopady průběhu rozsáhlé stavební úpravy tramvajové trati na funkci městské třídy. Během období letních prázdnin (27. 6. 2020-31. 8. 2020) byla využita probíhající rekonstrukce tramvajové trati v ulici Veveří v Brně k prověření nepřímých dopadů stavebních prací na funkci této ulice. Cílem bylo ověřit vzorce chování osob, respektive dopad na pohyb pěších a zejména na jejich fakultativní stacionární aktivity, tedy aktivity volnočasové, ne nutně vykonávané v rámci denního pracovního cyklu. Vedle dopadů na dopravní funkci městské třídy tak byly analyzovány i dopady na funkci pobytovou, která je v těchto případech často opomíjena.

Srovnávací metodou mezi stavy během a po rekonstrukci byl vyhodnocen přímý i nepřímý dopad na pohyb osob, jejich stacionární aktivity a vzorce chování. Doplnkově bylo provedeno šetření dopadů stavebních prací na komerční provozovny nacházející se přímo na zkoumané třídě.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Pro účely odborné práce v rámci pole sociální geografie je v současné době možné pozorovat posun ke kladení většího důrazu na otázky motivací a prožitků jednotlivých aktérů. Tento posun lze vysvětlit větším zájmem o praxeologickou metodologii [1] při popisu vzorců lidského chování namísto převažující pozitivistické metodologie. Z jistého hlediska ho je však možné zdůvodnit i poněkud větším potenciálem pro výzkum. Současné vědění v oblasti fyzické problematiky scén lze totiž považovat za konsolidované [2].

Vedle zjevné dopravní funkce městských ulic je stále větší důraz kladen na funkci pobytovou, a to zejména u významných tříd. Z transičního prostoru pěších se tak ulice stává i cílem jejich cest a místem fakultativních volnočasových aktivit [3]. Negativní dopad na sociální aktivity v ulicích s čistě transiční funkcí a na jejich okolí byl v minulosti opakovaně ukázán [4]. Pro pobytovou funkci městské ulice přitom není nutně určující množství transiční dopravy (pěší, silniční, kolejové i ostatní), ale spíše subjektivní hodnocení uživatelů týkající se vhodnosti prostoru pro jejich cílové fakultativní aktivity. Počátky uživatelsky orientovaného vědeckého přístupu k veřejnému prostoru je možné datovat až do roku 1913 v díle sociologa Roberta Parka [5].

3 METODIKA

Cílem metodiky bylo vybrat specifické prostorově a časově omezené oblasti, v rámci nichž jsou pak zkoumány konkrétní hypotézy [6].

Koncept stanic (stations) dle Hägerstranda [7] byl pro účely této práce rozšířen oproti jeho obvyklému užívání. Makroskopický model stanic jako časoprostorově omezeného prvku v rámci denních aktivit byl aplikován na prostorově omezené prvky v rámci mikroskopického modelu jednotlivých řešených lokalit. Koncept cest (paths) spojujících stanice tímto nebyl dotčen a je ho dále možné uplatňovat bez metodologické změny [8].

Čtyřrozměrný časoprostorový rámec dat tak byl celkově redukován na dvojrozměrný plošný rámec, který je vždy sám zasazen do specificky omezeného časového rámce. Tato metodologická změna byla provedena za účelem lepšího testování stanovených hypotéz, které jsou velmi úzce zaměřeny [9]. Bez provedené změny by bylo nutné sbírat značné množství dalších dat, která by však neměla pro samotný výzkumný záměr a jeho vyhodnocení relevanci.

Časové omezení oblastí

Bylo vybráno několik reprezentativních dní a v jejich rámci reprezentativní časová okna. Výběrem těchto časových úseků je zajištěno získání dat v extrémních případech, tedy v případech minimálního a maximálního celkového pohybu osob. Tímto způsobem mohou být zjištěny vzorce chování osob v okrajových stavech a závěr následně rozšířen na celé spektrum [9].

Sběr dat probíhal postupně ve špičkových a sedlových dnech a špičkových a sedlových časech. Jako špičkové dny byly zvoleny všední dny, jako sedlové soboty. Důvodem byl výběr standardních dnů, které reprezentují delší časové období v celém týdnu. Obdobně, jako špičkové časy byla stanovena doba od 15 do 18 hodin a jako sedlová doba období od 9 do 11 hodin. Výběr časů byl založen na standardní pracovní době a období cesty do zaměstnání a ze zaměstnání. Zvolené časy korespondují s dlouhodobě nastavenou frekvencí spojů hromadné dopravy. V rámci těchto časových období byla střední hodnota velikosti zachyceného vzorku 724 osob.

Prostorové omezení oblastí

Výběr zkoumaných oblastí byl určen předem, a to způsobem organizace výstavby během stavebních prací na tramvajovém tělese. Z důvodu zabezpečení stavby byl umožněn pohyb osob napříč ulicemi jen v některých místech. V ostatních místech sice nebyl fyzicky znemožněn, množství osob přímo procházejících stavbou však bylo minimální a tato skupina nebyla předmětem zkoumání. Zkoumána byla právě místa, ve kterých byl umožněn legální průchod osob stavbou a zároveň i za omezených podmínek i průchod osob s omezenou schopností orientace a pohybu.

Vybrány byly dva uliční profily, a to tak, aby byly přímo dotčeny probíhající stavbou a zároveň umožňovaly legální, a tedy plánovaný, pohyb osob napříč těmito profily. Podstatné pro výběr profilů bylo také to, aby jejich okolí mělo dlouhodobě (v období mimo rekonstrukci) i pobytový charakter. [10]. Toto kritérium bylo stanoveno proto, aby bylo možné zkoumat i tzv. fakultativní aktivity, tedy v jistém smyslu volnočasové, nikoliv povinné jako cesta do práce apod [11]. Do této kategorie bylo možné zařadit dvě místa – křižovatku ulic Veveří a Grohovy a křižovatku ulic Veveří a Slovákovy.

Vyhodnocování dat

Aby bylo možné s danou jistotou stanovit vliv stavby na vzorce chování obyvatel, byla využita srovnávací analýza stavu během a po probíhající rekonstrukci. Jelikož se stavba týkala čistě tramvajové trati a zastávkových ostrůvků, nikoliv celého uličního prostoru, je možné stav po rekonstrukci považovat za odpovídající stavu běžnému. Obdobná měření tedy byla provedena v období letních prázdnin 2020, během probíhající stavby a v období podzimu 2020, po dokončení rekonstrukce.

Přestože sběr dat probíhal v absolutních hodnotách, po jednotlivých vykonávaných určené aktivity, vyhodnocováno bylo poměrné zastoupení těchto aktivit. Cílem tohoto omezení bylo eliminovat různou velikost vzorků a zároveň umožnit zmenšení celého souboru dat na realizovatelnou velikost.

4 VÝSLEDKY

Střední hodnota velikosti vzorku dat v jednom zkoumaném časovém úseku byla 724 osob. Počet sledovaných období byl 16. Ze souboru bylo vyloučeno sledované období ze dne 24. 10. 2020, jelikož na sledované vzorce chování osob dopadlo nové opatření omezující režim komerčních provozoven, čímž došlo ke zkeslení vzorku vůči ostatním sledovaným.

Přehled procentuálního zastoupení sledovaných aktivit je ukázán níže (Tab. 1). Zaznamenány jsou osoby procházející (doba zdržení do 1 minuty), osoby užívající MHD (nastupující a vystupující), využívající služby (návštěva provozoven) a lokální pobytové aktivity, tedy aktivity cíleně umístěné do uličního prostoru.

Tab. 1 Srovnání podílu aktivit osob dle kategorií při rekonstrukci a mimo ni.

Podíl osob dle aktivit	Při rekonstrukci (abs.)		Mimo rekonstrukci (abs.)		Rozdíl (rel.)	
	Špička	Sedlo	Špička	Sedlo	Špička	Sedlo
Osoby procházející	61,3 %	61,7 %	58,0 %	56,1 %	+ 6 %	+9 %
Osoby užívající MHD	23,1 %	22,2 %	21,5 %	22,5 %	+7 %	- 2 %
Využívání služeb	9,5 %	8,6 %	11,9 %	11,0 %	- 20 %	- 22 %
Lokální aktivity	6,1 %	7,5 %	8,7 %	10,4 %	- 30 %	- 28 %

V rámci výsledků je možné sledovat mírný nárůst podílu osob procházejících a užívajících MHD vůči ostatním aktivitám. Rozdíl mezi špičkovými a sedlovými časy je zde zanedbatelný. Dále je možné pozorovat velmi výrazný pokles fakultativních aktivit, tedy využívání služeb a samotných pobytových aktivit. U služeb došlo k poklesu o 20-22 % během rekonstrukce, u lokálních aktivit pak o 28-30 %. Patrný je i vyšší podíl lokálních aktivit v sedlových časech. Změny v zaznamenaných trajektoriích pohybu nebyly výrazné. Směrodatná odchylka měření pohybujících se osob byla $\sigma < 4,2 \%$, u souboru využívání služeb a lokálních aktivit $\sigma < 1,5 \%$.

Jelikož nebylo možné vyloučit dopad opatření platných v době sběru dat, byla provedena ověřovací analýza přímo v dotčených provozovnách. Během podzimu 2020, tedy po ukončení rekonstrukce, bylo realizováno specializované dotazníkové šetření ve všech veřejných provozovnách v ulici Veveří. Sledovanými parametry byl typ provozovny (restaurace, prodejna, služby), provozování nebo neprovozování venkovní zahrádky během rekonstrukce a mimo ni a odhadovaný dopad rekonstrukce na tržby. Vždy bylo od respondentů vyžadováno zhodnocení situace z dlouhodobého hlediska pro co největší možné vyloučení faktoru dopadu vládních opatření v té době platných. Korekce dat byla provedena vyřazením provozoven s dobou existence méně než jeden rok, a to z důvodu absence možnosti srovnání s předchozími obdobími. Celkem se zúčastnilo 37 respondentů ze 44 možných provozoven. Výsledky ověřovací analýzy na provozovnách jsou uvedeny níže (Tab. 2).

Tab. 2 Ověřovací analýza dopadů na provozovny.

Typ provozovny	Návštěvnost byla ovlivněna		Tržby byly ovlivněny	
	Ano	Ne	Ano	Ne
Prodejna zboží	50 %	50 %	60 %	40 %
Služby	63 %	37 %	50 %	50 %

Ověřovací analýza provedená dotazníkovým šetřením ukazuje, že zásadní byl dopad probíhající rekonstrukce na provozovny restaurací, a to v 80 % případů. Část respondentů vyčíslila dopad na svoje tržby, a to v rozmezí 30

až 50 %. Dopad na prodejny zboží, včetně potravin a trafik, byl s ohledem na omezený počet respondentů minimální.

5 DISKUZE

Pokles o 20-22 % v případě využívání služeb a o 28-30 % v případě lokálních pobytových aktivit lze považovat za zásadní. Je nutné podotknout, že skutečný pokles je pravděpodobně ještě výraznější, jelikož v průběhu rekonstrukce panovaly značně přívetivější klimatické podmínky, které působí proti zjištěnému rozdílu.

Je nutné přiznat omezení relevance výsledků, které vzniklo v důsledku nestandardní situace v období sběru dat. Pohyb osob byl celkově omezen oproti běžnému stavu, a to v důsledcích vládních opatření při pandemii COVID-19. Samotná data, která byla zaznamenána, tímto ovlivněna přímo nebyla, nicméně je vhodné se domnívat, že celkový soubor dat je kvantitativně i kvalitativně omezenější. Kvalitativní omezení souboru dat se týká fakultativních činností ve veřejném prostoru, které byly nejvíce dotčeny. Nutné aktivity a nutný pohyb osob byly pravděpodobně dotčeny pouze z hlediska kvantitativního.

Výsledky týkající se pohybu osob je možné považovat za zcela relevantní, pouze by bylo vhodné provést ověřovací studii tak, aby byl zvětšen celkový analyzovaný soubor dat. Výsledky týkající se stacionárních aktivit je možné považovat za určitý pohled na problematiku a podnět pro další zkoumání, nicméně na základě výše uvedeného je relevance výsledků neověřitelná.

6 ZÁVĚR

Práce potvrzuje velký podíl fakultativních pobytových aktivit v prostoru městské třídy a jejich velkou náchylnost ke změně v závislosti na vnějších podmínkách.

Celkem bylo vyhodnoceno 16 dvouhodinových úseků ve špičkových a sedlových časech špičkových a sedlových dnů. Rozdíl mezi špičkami a sedlem se ze získaných výsledků ukázal jako nevýrazný, je však patrný výrazný rozdíl mezi stavem při rekonstrukci a mimo rekonstrukci. Tento rozdíl spočívá v nárůstu transitní funkce ulice o 6-9 %, poklesu využívání služeb o 20-22 % a poklesu lokálních fakultativních aktivit o 28 - 30 %. Skutečný pokles je pravděpodobně ještě větší, jelikož období rekonstrukce probíhalo za výrazně lepších klimatických podmínek, což působilo proti sledovanému trendu.

Jelikož jsou fakultativní aktivity uskutečňovány ze značné části v prostoru komerčních provozoven, je zjevná jejich vzájemná provázanost s množstvím vyskytujících se osob. Jakýkoliv dopad na jejich pohyb se pak projevuje i na provozovně samotných, což studie ověřila. Tento dopad je tím větší, čím více se jedná o volnočasovou fakultativní činnost. Z ověřovací analýzy je zřejmé, že negativní dopad na restaurace a jejich venkovní zahrádky byl značný, a to v metrice jejich návštěvnosti i tržeb. Skupina prodejen zboží a služeb byla negativně dotčena podstatně méně, což lze vysvětlit menší fakultativností jejich návštěvnosti než v případě restaurací.

Práce odpověděla na položené otázky a doplnila tak oborové poznání o studii vzorců prostorového chování osob ve specifickém časovém a prostorovém horizontu stavebních prací. Kromě toho ukazuje a kvantifikuje dopady stavebních prací na funkci veřejného prostoru a komerčních subjektů.

Poděkování

Výzkumný projekt a práce na něm byly financovány v rámci specifického výzkumu Interní grantové agentury VUT v Brně FAST-J-20-6387, "Analýza pohybu a stacionárních aktivit v profilu městské třídy".

Použité zdroje

- [1] VON HAYEK, Friedrich August. The Use of Knowledge in Society. In: The American Economic Review [online]. 35. 1945, s. 11 [cit. 2018-11-08].
- [2] LENNTORP, Bo. Time-geography – at the end of its beginning. In: GeoJournal. 48. 1999, s. 155-158. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1023/A:1007067322523>
- [3] WHYTE, William H. City: Rediscovering the Center. 1. New York: Anchor Books, 1990. ISBN 978-0385262095.
- [4] JACOBS, Jane. Ekonomie měst. 1. ČR: MOX NOX, 2012. ISBN 978-80-905064-1-1.
- [5] GOTTDIENER, Mark, Leslie BUDD a Panu LEHTOVOURI. Key concepts in urban studies. In: . Sage, 2015.
- [6] HÄGERSTRAND, Torsten. What about people in Regional Science?. In: Papers of the Regional Science Association. 24. 1970, s. 6-21. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/BF01936872>

- [7] GREGORY, Derek, ed. The Dictionary of human geography. 5. Oxford: B. Blackwell, 2009. ISBN 978-1-405-13288-6.
- [8] FRANTÁL, Bohumil. Prostorové chování: vzorce aktivit, mobilita a každodenní život ve městě. Brno: Masarykova univerzita, 2012. ISBN 978-802-1057-562.
- [9] FLOWERDEW, Robin a David M. MARTIN. Methods in Human Geography. Routledge, 2005. ISBN 9781315837277.
- [10] GEHL, Jan. Life between buildings: using public space. Washington, DC: Island Press, 2011. ISBN 978-159-7268-271.
- [11] GEHL, Jan a Birgitte SVARRE. How to study public life. Washington: Island Press, 2013. ISBN 978-161-0914-239.

POSOUZENÍ EVAKUAČNÍCH STANDARDŮ OSOB S HANDICAPEM S VYUŽITÍM MODELU EVAKUACE

ASSESSMENT OF EVACUATION STANDARDS OF PERSONS WITH MOVEMENT RESTRICTIONS USING THE EVACUATION MODEL

Lucie Dobiášová*, Tomáš Apeltauer

*Lucie.Dobiasova@vut.cz

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

V rámci české společnosti, která se především v posledních letech potýká s výrazným stárnutím populace, vzniká čím dále větší poptávka po vybudování zařízení zdravotnické a sociální péče pro osoby se zdravotním, pohybovým nebo sociálním omezením. Na základě projektů pro tyto budovy vznikají požárně bezpečnostní řešení vycházející z platných českých norem. Evakuace těchto budov je velmi specifická a jedním z klíčových faktorů je rychlost pohybu osob, v tomto případě osob s omezenou schopností pohybu a orientace. Tento článek se zabývá posouzením stávajících platných českých norem vůči zahraničním standardům. Ze získaných poznatků jsou vytvořeny modely evakuace na jejichž základě jsou stanoveny možnosti optimalizace zejména v problematice určování rychlosti pohybu osob.

Klíčová slova

Evakuace, pohyb osob, pohybové omezení, numerický model, normativy

Abstract

In recent years, the Czech society has been struggling with a significant increase in the elderly population. This is resulting in an increasing demand for the construction of health and social care facilities for people with health, movement or social limitations. The plans for these buildings are based on current Czech fire safety regulations. The evacuation procedures required by those regulations are very specific and one of the key factors is the ambulatory speed of the patients, in this case persons with reduced mobility. This article deals with the assessment of existing applicable Czech norms against foreign standards. Based on the comparisons, the evacuation models are developed to optimize possible procedures, particularly with consideration of patient speed and mobility.

Key words

Evacuation process, pedestrian movement, impaired movement, numerical model, standards

1 ÚVOD

Aktuální stav společnosti a zejména demografická data dokládají, že všeobecné stárnutí populace je typickým znakem nejen současné doby, ale zejména doby budoucí [1]. Stoupá kvalita životního prostředí i života samotného a společně s významnými pokroky ve zdravotnictví se tak prodlužuje délka života obyvatel, a to i v případě chronických onemocnění, která bezprostředně ovlivňují kvalitu života. Může tak nastat situace, že si daná osoba není schopna zajistit základní potřeby a je odkázána na pomoc druhých. Aby byla zajištěna adekvátní péče o tyto osoby, je nezbytné vybudovat dostatečnou síť zařízení zdravotnické a sociální péče, jako jsou například léčebny pro dlouhodobě nemocné, sanatoria, ozdravovny, nebo ústavy sociální péče. Pro každé takové zařízení je zpracováno požárně bezpečnostní řešení.

ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb – nevýrobní objekty je kmenovou normou v otázce požární bezpečnosti [2]. V případě léčen nebo ústavů se dále vychází z ČSN 73 0835 Požární bezpečnost staveb – Budovy zdravotnických zařízení a sociální péče [3]. V rámci těchto norem je specifikace pohybu osob a jejich rychlostí jen velmi malá.

Rozmanitost v nárocích na pohyb v rámci populace je nemalá. Zejména pak u osob s omezením pohybu a orientace. Mezi tyto lze řadit nejen osoby staršího věku, ale také třeba osoby s postižením ať už pohybovým,

zrakovým, nebo mentálním. Jejich pohybové možnosti a potřeby přímo ovlivňují průběh případné evakuace. Evakuace zdravotnických a sociálních zařízení se proto jeví jako velmi náročná a specifická. Článek si dává za úkol posoudit dostupné parametry pro pohyb osob v rámci českých normativů a dát je do souvislosti se zahraničními standardy, případně poznatky ze zahraniční praxe. Získané výstupy jsou aplikovány v evakuačních modelech za účelem porovnání vstupních parametrů zejména v problematice rychlosti pohybu osob. Na základě získaných dat je navržena možnost optimalizace přístupu k evakuaci osob s omezením pohybu a jejich rychlosti pohybu.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

V rámci českých požárně bezpečnostních norem je při výpočtech uvažováno s rychlostí pohybu osob bez pohybových omezení, a to po rovině a při pohybu po schodech. V případě výskytu osob neschopných samostatného pohybu, nebo se schopností omezenou, je do výpočtů zahrnut součinitel (s) vyjadřující podmínky evakuace [2]. Zahraniční přístupy k evakuaci osob vychází z dat získaných na základě studií a experimentů z oblasti pohybu osob. Respektují tak jedinečné prostorové nároky osob, jejich rychlost chůze a specifika vyplývající z užívání kompenzačních pomůcek [3]. Aplikace těchto poznatků do prostředí modelu může přinést detailnější rozbor dané situace a z toho vyplývající analýzu rizik, které nemusí být při klasickém normovém postupu odhaleny. Samotný průběh evakuace může ovlivnit i přítomnost elektronické požární signalizace a evakuačních systémů (např. domácího rozhlasu a další techniky), které prochází neustálým vývojem.

České technické normy

Při posuzování lůžkových oddělení zařízení zdravotnické a sociální péče se vychází z kmenové normy ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb – nevýrobní objekty a ČSN 73 0835 Požární bezpečnost staveb – Budovy zdravotnických zařízení a sociální péče, které tvoří a vydává Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví [2], [3]. Tato zařízení jsou specifická složením osob podle schopnosti pohybu. ČSN 73 0835 udává procentuální skladbu osob pro jednotlivé provozy v těchto zařízeních podle schopnosti pohybu klientů. Obě normy rozlišují pouze základní členění na osoby schopné samostatného pohybu, s omezenou schopností pohybu a neschopné samostatného pohybu. Neodráží tak specifické potřeby vyplývající z pohybových omezení daných osob. Normové výpočty jsou omezeny pouze na přesně definované vstupní veličiny a nemohou tak postihnout stochastické prvky reálné evakuace osob z těchto zařízení.

Zahraniční přístupy

Mezi celosvětově nejuznávanější publikace patří SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, kterou vydala Society of Fire Protection Engineers poprvé v roce 1988 [4]. V nejnovějším pátém vydání z roku 2016 poskytuje komplexní zpracování současných postupů v oblasti požárního inženýrství – požární bezpečnost, dynamika požáru, analýza rizik, modelování, aj. Rozdílnostem v pohybu osob je detailně řešena v několika kapitolách. Udávané hodnoty jsou založeny na výzkumech a experimentálních zjištěních. Vedle samotného pohybu osob v návaznosti na jejich fyzické možnosti jsou zde řešeny kupříkladu rychlosti ve vztahu k hustotě dopravního proudu. Kromě tělesných předpokladů a nezanedbatelného vlivu okolí je v publikaci SFPE Guide to Human behavior in Fire rozbor psychologických a sociálních vlivů na pohyb osob v daném prostředí [5].

Mezi další mezinárodní organizace patří National Fire Protection Association, která se zaměřuje na eliminaci následků způsobených mimo jiné požáry. V rámci organizace vznikl soubor standardů a kodexů, kde mezi nejzásadnější patří NFPA 101 Life Safety Code [6]. Pro zdravotnická zařízení pak vznikla NFPA 99 Health Care Facilities Code [7].

Model evakuace

V českém prostředí není doposud běžnou praxí využívat simulačních nástrojů pro evakuaci osob ze zařízení zdravotnické a sociální péče a jsou pouze doplňkovou metodou posuzování požární bezpečnosti budov. Modely umožňují komplexní posouzení daného prostoru, určit jeho limity a odhalit kritická místa. Při modelování jde o snahu se v maximální možné míře přiblížit realitě a dosáhnout tak průkazných výsledků. Na využití modelu probíhá proces simulace, při kterém dochází k napodobování zkoumaného děje. Pro tvorbu plnohodnotného modelu a následnou simulaci je nutné zvolit vhodné simulační nástroje. Pro účely této práce byl zvolen Pathfinder společnosti Thunderhead Engineering Consultants, Inc. [8].

3 METODIKA

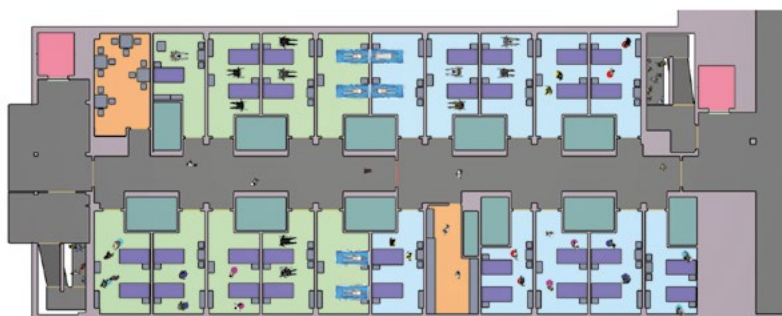
České technické normy zajišťující oblast požární bezpečnosti zdravotnických zařízení a zařízení sociální péče zejména v rámci ČSN 73 0802 a ČSN 73 0835. Proces evakuace a jeho podmínky jsou definovány v kapitole 9 kmenové normy. Zde je i definována rychlost pohybu osoby bez omezení, která po rovině činí $25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. V rámci výpočtů pro minimální počet únikových pruhů a pro výpočet doby evakuace definuje norma také součinitel (s), který zohledňuje podmínky evakuace. Jeho hodnota je udávána na základě tabulky dle typu únikové cesty, postupu evakuace a dle pohybových možností evakuovaných osob. Jednotlivá specifika pohybových omezení nejsou zohledňována. Ve výpočtech se má blíže nedefinovaným způsobem přehlednout k počtu ošetřujících osob a prostředkům evakuace (šířka vozíku aj.), které ji budou provádět. Kdo je osobou s omezenou schopností pohybu nebo osobou neschopné samostatného pohybu je definováno v kapitole 8.14 [2].

SFPE Handbook sdružuje velké množství studií, na jejich základě vznikl přehled o rychlostech pohybu osob. Jedním z faktorů bezprostředně ovlivňující rychlost pohybu je i hustota dopravního proudu. V rámci kapitoly 64 jsou publikovány rychlosti pohybu osob, které byly následně použity v modelu evakuace.

Tab. 1 Rychlostní parametry pohybu osob [9], [10], [11].

Parametry:	$v \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$v_{\text{min}} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$	$v_{\text{max}} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$	σ
Senior	0,95	0,24	1,68	0,32
Zrakové omezení	0,98	0,35	1,72	—
Kompenzační pomůcky:				
Berle	0,94	0,63	1,35	0,3
Hůl	0,81	0,26	1,6	0,26
Rollator	0,57	0,1	1,02	0,29
Elektrický vozík	0,89	0,85	0,93	—
Mechanický vozík	0,69	0,13	1,35	0,69
Mech. vozík s asistentem	1,3	0,84	1,98	0,34
Lůžko	1,27	1,03	1,53	0,23

Jak zařízení sociální péče, tak zdravotnická zařízení jsou často obsazována klienty nebo pacienty neschopných samostatného pohybu, případně upoutaných na lůžko. Manipulace s lůžky, a zejména v procesu evakuace, je velmi obtížná. Coronavirová pandemie v roce 2020 otevřela debatu a podnítila zvýšenou poptávku po výzkumech v oblasti evakuace lůžkových oddělení [9], [12].



Legenda:

■ Pokoje úseku C2	■ Pokoje úseku C1	■ Evakuační výtahy	■ Ostat. provoz
■ Únikové cesty	■ Koupelny	■ Lůžka	

Obr. 1 Zkoumané podlaží lůžkového oddělení.

Pro tvorbu modelu byla použita dokumentace pro výstavbu nestátního zdravotnického zařízení dlouhodobé péče. Jedná se o pěti podlažní budovu, tvořenou východním a západním křídlem a centrální částí spojující tato křídla. V rámci dokumentace je objekt rozdělen na jednotlivé požární úseky, včetně únikových cest a skladby osob vyskytujících se v daných úsecích. Objekt je vybaven požární bezpečnostními zařízeními včetně evakuačních systémů (domácím rozhlaselem). Pro účely této práce bylo zvoleno druhé nadzemní podlaží východního křídla. Obsazenost pokojů je zachována dle počtu lůžek. V rámci práce byly vytvořeny modelové skupiny klientů dle

percentuálního zastoupení pohybových omezení osob. Tato část podlaží je rozdělena do dvou požárních úseků rozdělených požárně dělícími uzavěři. Tyto je možné opustit pomocí výtahů, nebo za použití přilehlého schodiště.

Všeobecný scénář evakuace nepočítá s bezprostředním výskytem požáru. Evakuace je současná za asistence nejen personálu na lůžkovém oddělení, ale je zamýšleno i s pomocí návštěvníků a administrativních pracovníků, kteří se v době zahájení evakuace vyskytují v prvním nadzemním podlaží. Osob s omezením pohybu je 37 bez rozlišení stupně soběstačnosti. Zdravotnický a jiný personál je v daném prostoru v počtu 33 osob. Celkový počet evakuovaných osob je 70. Jednotlivé scénáře se liší ve vstupních parametrech rychlostí pohybu osob. Vytvořeny byly scénáře dle rychlostí vycházejících z ČSN, z SFPE a z výchozího nastavení softwarového nástroje. Další parametry softwarového nástroje zůstávají ve všech scénářích v původním nastavení.

4 VÝSLEDKY

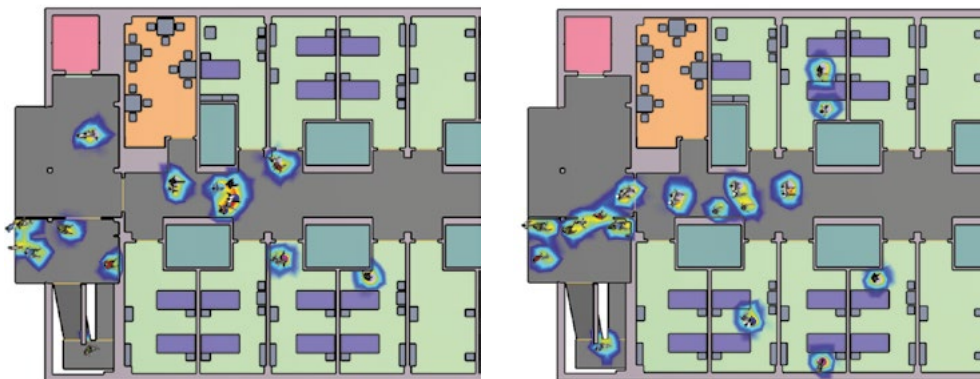
Na základě modelu vzniklo pět scénářů. Sledována byla doba vyliďnění modelu.

Tab. 2 Výsledné doby vyliďnění modelu.

	Střední hodnota μ	Směrodatná odchylka σ	v [$m \cdot s^{-1}$]	Pozn.
ČSN	228,5 s	17,66	0,58	Konstantní rychlost [2]
SFPE*	216,4 s	13,56	—	Dle Tab. 1
Pathfinder	139,0 s	10,30	1,19	Konstantní rychlost [8]
Dílčí hodnoty:				
Senior	150,1 s	19,86	—	Dle Tab. 1
Rollator	287,6 s	42,77	—	Dle Tab. 1

* Rovnoměrné zastoupení osob dle pohybového omezení

Scénáře je možné porovnat na základě číselných hodnot doby vyliďnění i na základě výstupů simulace.



Obr. 2 Srovnání scénáře Rollator a ČSN v 70. sekundě simulace v úseku C1.

Pro normový výpočet doby evakuace byl použit vztah [2]:

$$t_u = \frac{0,75 \cdot l_u}{v_u} + \frac{E \cdot s}{K_u \cdot u} \quad (1)$$

kde l_u je délka únikové cesty, v_u rychlost pohybu osob, E počet evakuovaných osob, s součinitel podmínek evakuace, K_u jednotková kapacita únikového pruhu, u započítatelný počet únikových pruhů.

Výsledná hodnota pro daný úsek činí $t_u = 1,14$ min.

5 DISKUZE

Osoby ve scénáři ČSN se pohybovaly konstantní rychlostí, bez náhodné distribuce veličin. Konstantních veličin bylo užito i ve scénáři s výchozím nastavením parametrů Pathfinderu. Scénář SFPE umožnil náhodnou distribuci rychlosti mezi osoby dle jejich pohybového omezení. Výsledné doby vyliďnění modelu jsou uvedeny v Tab. 2. Na základě těchto dat je zřejmé, že při aplikaci rychlosti pohybu osob dne ČSN jsou výsledné doby téměř srovnatelné se scénářem respektující pohybová omezení osob. Udávaná rychlost pohybu v rámci ČSN je posunuta výrazně na stranu bezpečnou, která umožňuje evakuaci osob i s výrazným pohybovým omezením, nebo zcela neschopných samostatného pohybu v přibližně stejné době, jako je tomu u scénáře respektující pohybové schopnosti a potřeby osob. Vliv rozdílných hodnot pohybu osob je zřejmý z porovnání simulací těchto dvou scénářů, viz Obr. 2. Osoby opouští požární úsek pomocí schodiště, popř. výtahu. V 70. sekundě záznamu je většina osob ve scénáři SFPE již na únikové cestě, což je způsobeno vyšší rychlostí pohybu personálu, který přichází pomoci osobám s pohybovým omezením. Ve scénáři ČSN se tyto osoby pohybují stejnou rychlostí, proto do lůžkových pokojů přichází se zpožděním. Doba vyliďnění modelu s výchozím nastavením parametru programu je téměř o 100 s rychlejší, neodráží tak časové nároky osob s pohybovým omezením.

Jednotlivé scénáře, specifikované pouze pro jeden typ omezení s charakteristickými rychlostmi, mají dle předpokladu doby vyliďnění modelu úměrné vřči aplikovaným parametrům.

Na základě dostupných dat byla vypočítána i normová doba evakuace dle vzorce. Výsledný čas evakuace činí 1,14 min, což je o 70 % kratší doba, než která byla prokázána v rámci scénáře ČSN. Normový vzorec nemá možnost reflektovat specifické situace, které mohou během evakuace nastat, ať už se jedná o vliv prostředí, dispoziční řešení prostor, tělesné rozměry osob, jejich prostorové nároky ovlivněné použitím kompenzační pomůcek, prostorové konflikty při pohybu osob aj.

Z výše uvedených závěrů lze konstatovat, že rychlost pohybu osob uvedená v ČSN se prokázala v tomto konkrétním modelu a prostředí jako vyhovující. Za jejího užití bylo dosaženo stejných výsledků, jako za použití specifických rychlostí pohybu osob dle jednotlivých omezení dle SFPE. ČSN udává rychlostní hodnoty výrazně na stranu bezpečnou, což umožňuje jejich použití při simulaci pohybu osob s pohybovým omezením. Jako nedostačující se jeví normový výpočet pro dobu evakuace, který by v případě srovnání výstupů simulace neumožnil bezpečnou evakuaci těchto osob. Možnosti optimalizace se jeví zejména v oblasti normového výpočtu. Na základě zahraničních zkušeností je nezbytné evakuaci posuzovat na základě mnoha parametrů, které umožní vytvořit realističtější obrazu dané situace, než tomu v současnosti umožňuje ČSN. Minimálně akceptací rozličných hodnot pro pohyb osob dle omezení by byly umožněny přesnější výpočty v rámci jednotlivých specifických situací. Mezi technické prostředky, ovlivňující průběh evakuace, náleží kupříkladu instalace domácího rozhlasu. Dalšími vlivy, které bezprostředně působí na pohyb osob, a nebyly zahrnuty ve výzkumu, jsou dle zahraničních zkušeností zejména tělesné rozměry osob, reakční doba, psychologické a sociální vlivy aj.

6 ZÁVĚR

Jedním z klíčových faktorů ovlivňující průběh evakuace je rychlost pohybu osob, o tom více osob s pohybovým omezením. Cílem projektu bylo posouzení českých standardů se zahraničními a poznatky z praxe. Za tímto účelem byl vytvořen model evakuace osob v programu Pathfinder ze zařízení sociálních služeb. Na základě výstupů simulací byly posouzeny scénáře, které vznikly při použití rozličných vstupních parametrů pro rychlost pohybu osob. Hodnota rychlosti pohybu osob je v rámci ČSN uvedena výrazně na stranu bezpečnou, což prokázala i její aplikace v rámci modelu s následně porovnání s výstupy, které byly vytvořeny na základě scénáře SFPE, který respektuje rozdílné rychlosti pohybu osob dle jejich možností a potřeb. Výrazný rozdíl byl zaznamenán u normového výpočtu doby evakuace, který respektuje přítomnost osob s pohybovým omezením během evakuace na základě parametru (s). I přes to byla vypočtená doba evakuace výrazně kratší, než dokládaly výstupy simulace. Zejména zde je prostor pro možnosti optimalizace. Použití rozličných hodnot rychlosti pohybu by umožnilo další přiblížení k realistickému průběhu evakuace a jeho posouzení. Dle zahraničních standardů a praxe není však rychlost pohybu osob jediným významným faktorem. Pole optimalizace je zde široké. Získané poznatky nejsou omezeny pouze na prostředí obytných budov. Osoby s omezením pohybu nebo orientace se vyskytují na všech veřejně přístupných prostranstvích. Průběh a doba evakuace tak mohou být ovlivněny v prostředí obchodních center, dopravních uzlů, úřadů, nebo kupříkladu kulturních akcí na otevřených prostranstvích měst.

Poděkování

Článek vznikl za podpory juniorského specifického výzkumu FAST-J-20-6472.

Použitá zdroje

- [1] CZSO Vývoj obyvatelstva České republiky 2019. [online]. [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/121768528/13006920a01.pdf/5f986047-3692-4738-b63f-db727d1bf68d?version=1.1>
- [2] ČSN 73 0802 (730802) Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [3] ČSN 73 0835 (730835) Požární bezpečnost staveb - Budovy zdravotnických zařízení a sociální péče. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [4] HURLEY, Morgan J. SFPE Handbook of fire protection engineering. Fifth edition. New York: Springer, [2016]. ISBN 978-1-4939-2564-3.
- [5] SFPE guide to human behavior in fire. Cham: Springer, [2019]. ISBN 978-3-319-94696-2.
- [6] NFPA 101: Life safety code 2018. 2018 edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association, [2017]. ISBN 978-145591790-7.
- [7] NFPA 99: Health Care Facilities Code 2018. 2018 edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association, [2017]. ISBN 978-145591683-2.
- [8] PATHFINDER User manual. 2020-4 version. [online]. Thunderhead Engineering Consultants [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: <https://files.thunderheadeng.com/support/documents/pathfinder-user-manual-2020-4.pdf>
- [9] KWAK, Jaeyoung, Michael H. LEES, Wentong CAI, Ahmad Reza POURGHADERI a Marcus E.H. ONGAR. Estimating horizontal movement performance of patient beds and the impact on emergency evacuation time. ArXiv [online]. 2020 [cit. 2020-11-08]. Xiv:2006.02169
- [10] SØRENSEN, JG, DEDERICHAS AS. Evacuation characteristics of blind and visually impaired people: walking speeds on horizontal planes and descending stairs. In: Proceedings of fifth international symposium on human behaviour in fire, Cambridge, England, 19–21 September 2012. Interscience Communications, pp 304–314.
- [11] BOYCE KE, SHIELDS TJ, SILCOCK GWH (1999a). Toward the characterization of building occupancies for fire safety engineering: capabilities of disabled people moving horizontally and on an incline. Fire Technol. 35 (1): 51–67.
- [12] HAVERKORT, J.J. Mark, Tessa H. BIESHEUVEL, Frank W. BLOEMERS, Mirjam B. DE JONG, Falco HIETBRINK, Lukas L. VAN SPENGLER a Luke P.H. LEENEN. Hospital evacuation: Exercise versus reality. Injury [online]. 2016, 47(9), 2012-2017 [cit. 2020-11-02]. ISSN 00201383. Dostupné z: doi:10.1016/j.injury.2016.03.028

2.

Dopravní stavby

Transportation Engineering

AUTOBUSOVÁ NÁDRAŽÍ – CESTUJÍCÍ A VOZIDLA

BUS STATIONS - PASSENGERS AND VEHICLES

Pavel Stupka^{*,1}

* stupka.p@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

Článek se zabývá návrhem autobusových nádraží a snaží se tuto problematiku popsat ze dvou různých pohledů. Prvním je návrh nádraží a jeho funkčnost z pohledu řidiče. S tím je úzce spojený návrh autobusových stání, která svým tvarem ovlivňují celkovou zastavěnou plochu nádraží. Druhým je pohled cestujícího, který bude využívat pěší komunikace v prostoru nádraží a dostává se do přímého kontaktu s autobusovou dopravou. Práce se dále věnuje vztahu mezi cestujícím a vozidlem, kdy popisuje některé vhodné či nevhodné návrhy autobusového nádraží.

Klíčová slova

Autobusové nádraží, linková doprava, pěší doprava, cestující, návrh

Abstract

The article deals with design of bus stations and tries to describe the problems from two different perspectives. The first one is design of station and its functionality from the driver's point of view. Which is closely related to design of a stop bay, whose shape affects total built-up area of the station. Another point of view is the passenger's one, who will use pedestrian roads in station area and comes into direct contact with bus transport. The article also deals with the relationship between the passenger and the vehicle, which describes some suitable or inappropriate designs of the bus station.

Key words

Bus station, regular services transport, pedestrian transport, passenger, design

1 ÚVOD

Autobusová nádraží se obvykle nachází v blízkosti sídel s návazností na městskou infrastrukturu. Jedná se o uzly významně zatížené autobusovou a pěší dopravou, které se při špatném návrhu mohou stát nepřehlednými a nebezpečnými místy.

Od 60. let minulého století se s rozvíjející automobilizací měnil i vzhled měst. Ulice a náměstí se staly vstřícné k automobilům a byl potlačen význam pěší dopravy. S tímto rozvojem se rozvíjela také autobusová doprava a často si můžeme všimnout, že na autobusových nádražích byl význam chodce potlačen. Na náměstích nebo v ulicích je automobilová doprava v konfliktu s pěší dopravou, ale na autobusových nádražích je jejich koexistence nutná [1]. Autobusová nádraží s předimenzovanými plochami dopravy jsou pohodlná pro autobusy, ale ne pro cestující, kteří se musí po těchto plochách pohybovat.

Cíli práce je zaměřit se na problematiku pěší dopravy a návrhu autobusových stání na autobusových nádražích. Dále zjistit, jak tuto problematiku řeší česká a zahraniční literatura, zhodnotit vlastní poznatky s existujícími řešeními autobusových nádraží a navrhnout příklady možných řešení autobusových stání.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED

V současné době se v Česku problematikou autobusových nádraží, přestupních uzlů a zastávek zabývá norma ČSN 73 6425, která rozděluje uzly podle různých kritérií. Za zmínku stojí rozdělení podle funkce na přestupní uzly městské linkové osobní dopravy, přestupní uzly regionálního významu a přestupní uzly nadregionálního významu (celostátního a mezinárodního významu) [2]. Při návrhu autobusového nádraží právě toto funkční dělení (a s ním spojený počet obsluhujících autobusů) rozhoduje o velikosti a měřítku nádraží. Kniha Dopravní systémy a stavby

rozděluje autobusová nádraží na malá (do 150 odjezdů za den), střední (150 až 300 odjezdů za den) a velká (více než 300 odjezdů za den) [3]. Podle tohoto dělení se například Ústřední autobusové nádraží Zvonařka (Brno) s cca 650 odjezdy za den řadí mezi velká autobusová nádraží a autobusové stanoviště Benešova (Brno) s cca 160 odjezdy za den ke středním nádražím [4]. Za malá autobusová nádraží se dají považovat nádraží v menších městech nebo v městských částech, například autobusové nádraží ve Vizovicích, které je součástí náměstí.

Plocha autobusového nádraží se dá rozdělit na jednotlivé dílčí plochy jakými jsou:

- přednádražní prostor
- pěší komunikace
- čekárny
- odbavovací haly
- vybavenost nádraží (technická a služby)
- pojižděné plochy
- servisní zařízení pro autobusy (ne všechna technická zařízení musí být součástí nádraží, například odstavné plochy pro delší odstavení autobusů se mohou nacházet mimo nádraží)
- ostatní zařízení

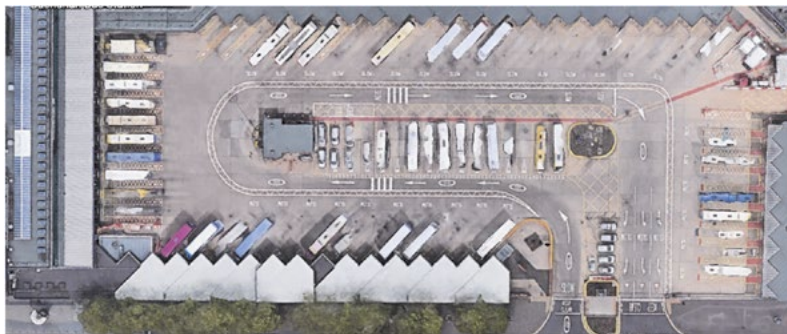
Při návrhu cest pro pěší je potřeba zohlednit předpokládané zatížení nádraží – se zvyšující se hustotou chodců se snižuje prostor pro chůzi, a tudíž se snižuje rychlost chůze [5]. Cesty vykonané cestujícími by měly být bez zbytečných závrtek a překážek. Také je potřeba zohlednit bezpečnost chodců a snažit se navrhnout nádraží s co možná nejmenším počtem křížení s pojižděnými komunikacemi. Podle normy ČSN 73 6110, která hodnotí kvalitu pěší dopravy, se plochy rozdělují na:

- plochy určené k čekání – na těchto plochách je minimální hodnota úrovně kvality dopravy C a to $0,7 \text{ m}^2$ na jednoho chodce, např. nástupiště nebo čekárny. Předpokládá se, že lidé se na těchto místech tolik nepohybují.
- plochy určené k chůzi – na těchto plochách je minimální hodnota úrovně kvality dopravy C a to $2,2 \text{ m}^2$ na jednoho chodce, např. přístupové komunikace. Na nádražích je běžné, že se vytváří vlny cestujících (příjezd/odjezd více vozidel v jeden čas). Právě na tato zatížení je potřeba navrhnout přístupové komunikace. Je potřeba se vyvarovat různým zúžením či překážkám, které by negativně ovlivnily plynulost provozu na pěších komunikacích [2], [6], [7].

Při návrhu autobusového nádraží je potřeba zvážit, pro jaký účel bude nádraží sloužit, v jaké poloze se nachází, kde bude příjezdová komunikace, kde je předpokládaný hlavní přístup cestujících a jak velká plocha je k dispozici [8].

3 PRŮZKUM STÁVAJÍCÍCH NÁDRAŽÍ

Většina výsledků byla získána pozorováním chování účastníků provozu na českých a evropských autobusových nádražích. Za zmínku stojí Buchanan Bus Station ve městě Glasgow s hřebenovitými stánými, kde cestující přichází do kontaktu s autobusem až na nástupišti (viz Obr. 1).



Obr. 1 Buchanan Bus Station.

Opačná situace je na Warszawa Bus Station Zachodnia s kolnými průjezdnými stánými, kde cestující musí použít pro příchod na nástupiště dlouhý přechod (viz Obr. 2). V polském městě Poznaň je autobusové nádraží

s hřebenovitými stánými součástí vlakového nádraží, a přestože cestující nemusí překonat žádnou komunikaci, musí překonat několikaúrovňovou cestu skrz nákupní centrum.



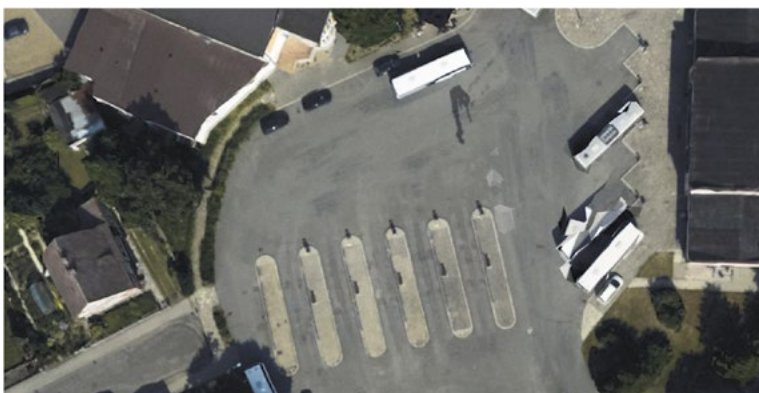
Obr. 2 Warszawa Bus Station Zachodnia.

Autobusové nádraží Frankfurt Central Station je navrženo kombinací hřebenovitých a zešíkmených stání. Tento návrh ukazuje efektivní využití malého prostoru určeného pro nádraží (viz Obr. 3).



Obr. 3 Frankfurt Central Station.

Na českých nádražích se většinou jedná o podélná stání. Za zmínku stojí zrekonstruované autobusové nádraží v Lanškrouně, kde byla použita kombinace pilovitých a průjezdných stání. Z Obr. 4 je vidno, že šest průjezdných stání zabírá dvakrát větší plochu než šest pilovitých stání (včetně manipulačních ploch). V porovnání s nádražím ve Frankfurtu s 14 nástupišti je nádraží v Lanškrouně rozlohou o 500 m² větší, a navíc o dvě stání menší.



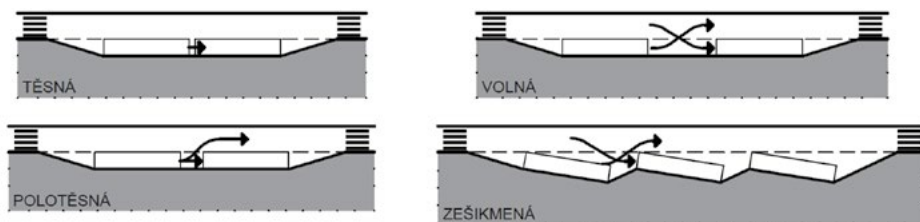
Obr. 4 autobusové nádraží v Lanškrouně.

4 VYBRANÉ NÁVRHOVÉ PRVKY

Funkčnost nádraží je možné vyjádřit z pohledu řidiče autobusu, tzn. všechna autobusová stání a pojižděné komunikace musí být navrženy tak, aby umožňovaly plynulý pohyb vozidel. Z pohledu cestujícího se pak jedná o komunikace pro pěší a přístupy k nástupištím. Právě správné zvolení tvaru autobusového stání může pozitivně ovlivnit přístup na nástupiště. V ČSN 73 6425 se můžeme dočíst o třech typech podélného autobusového stání (viz níže), nicméně tato stání nejsou zdaleka všechna, která se dnes ve světě používají [2].

Autobusová stání podélná – úhel mezi stáním a nástupištěm je 0-15°:

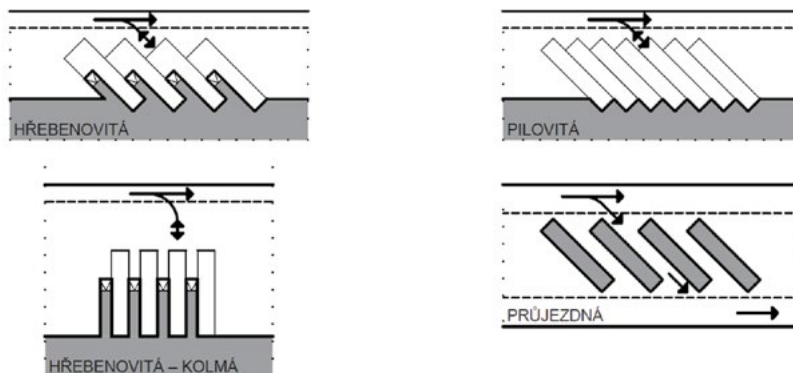
- Těsná – Vhodná pro linkovou hromadnou dopravu. Stanicující autobus zůstává u nástupiště nezbytnou dobu pro nástup či výstup. Autobus může odjet až po odjezdu předchozího autobusu, autobusy najíždí postupně za sebe.
- Polotěsná – Obdobné využití jako těsná. Autobus může vyjet, i když před ním stojí další autobus, ale nemůže najet před stojící autobus.
- Volná – Vhodná pro dálkovou a regionální autobusovou dopravu, nevýhodou je velká délka pro vytvoření autobusového zálivu. Autobus se může pohybovat bez ohledu na stojící autobus u jiného stání.
- Zešíkmená – Stejně využití jako volná stání. Autobus se může pohybovat bez ohledu na stojící autobus u jiného stání. Výhodou je ušetření délky takto vytvořeného zálivu oproti volným stáním.



Obr. 5 Autobusová stání podélná.

Autobusová stání šikmá a kolmá – úhel mezi stáním a nástupištěm je 30-90° (při návrhu pravého úhlu u níže uvedených tří uspořádání se jedná o stání kolmá):

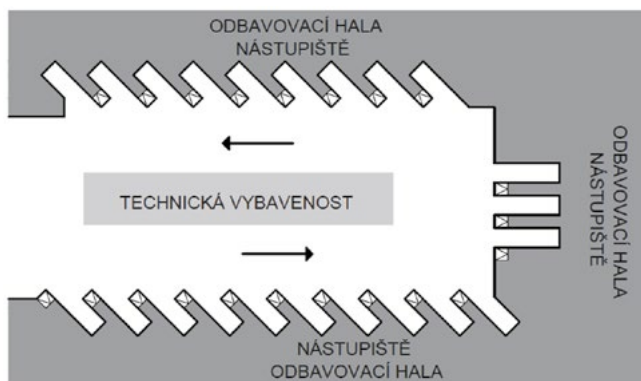
- Hřebenovitá – Vhodná pro využití u dálkové nebo regionální autobusové dopravy, nutnost couvání autobusu. Pro příklad je v Obr. 6 uvedeno i kolmé stání.
- Pilovitá – Vhodná spíše pro odstavňá autobusová stání. Výhodou je úspora prostoru, nevýhodou je z pohledu cestujícího nekomfortní přístup k zavazadlovému prostoru. V případě, že by byl úhel 90°, ztrácí původní smysl název "pilovitě".
- Průjezdná – Z pohledu řidiče se za výhodu může počítat jednoduché najetí i vyjetí z takového stání, z pohledu cestujícího je velkou nevýhodou přístup na nástupiště. Další nevýhodou je velký zábor prostoru.



Obr. 6 Autobusová stání šikmá a kolmá.

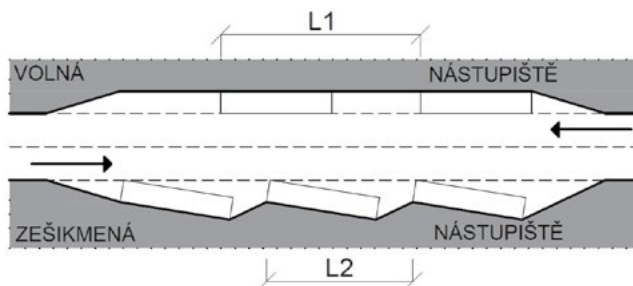
5 VYHODNOCENÍ

Nejkritičtějším místem na autobusových nádražích jsou pro cestující místa, kde se kříží pěší doprava s vozidly (přechody, místa pro přecházení). Jednou z možností, jak takto místa eliminovat, je navrhnout nádraží tak, aby nedocházelo ke křížení pěších komunikací s ostatní dopravou – to znamená navrhnout nádraží ve tvaru písmen U nebo L. U takto navrženého tvaru nádraží (střední a velká nádraží) a při použití jakéhokoliv z výše uvedených podélných stání by návrh byl značně neefektivní, a to z důvodu malého počtu nástupišť. Při použití některého z šikmých či kolmých stání, případně jejich kombinace, se počet nástupišť znásobí (viz Obr. 7). Výhodou takto navrženého nádraží je úplné oddělení prostoru pro cestující od pojížděných prostorů. Další výhodou je přehlednost označení nástupišť nebo přímé propojení nástupišť s odbavovací halou.



Obr. 7 Příklad bezkolizního autobusového nádraží (pěší vs. autobusy) ve tvaru U.

Na Obr. 8 je možné vidět porovnání zešikmených a volných stání. Obě stání umožňují výjezd či nájezd bez ohledu na vozidlo stojící u vedlejšího stání. Na délce, která umožňuje navrhnout tři zešikmená stání, je možné navrhnout pouze dvě stání podélná. Zešikmená stání díky svému tvaru vytváří prostor pro naložení a vyložení zavazadel. Oproti tomu u podélného stání (a při mnohdy úzkém nástupišti) se manipulace se zavazadly odehrává v proudu procházejících cestujících, kteří si navzájem překážejí. Při použití zešikmených stání je možné navrhnout více stání u jedné "nástupní" hrany, což umožňuje efektivnější nakládání s plochou. V případě použití 15m autobusů je hodnota L2 o 7,2 m kratší než hodnota L1.



Obr. 8 Porovnání zešikmeného a volného stání.

Častým kritériem pro návrh nástupiště je jeho délka (vychází z rozměrů vozidla), ale nemělo by se zapomínat na šířku nástupiště. Při návrhu ploch určených pro pěší je možné postupovat podle normy ČSN 73 6110. Návrh nástupiště by měl splňovat minimální požadavek normy, a to 0,7 m² pro jednoho čekajícího (cca 0,84 x 0,84 m). Při délce nástupiště 15 m a předpokladu 30 lidí čekajících na autobus by měla být minimální šířka nástupiště 1,4 m. K této ploše je nutné připočítat prostor, ve kterém se bude předpokládat pohyb ostatních cestujících, kteří prochází k jinému nástupišti nebo směrují k východu. Prostor určený pro pohyb by měl být v dimenzích odpovídajících předpokládanému zatížení cestujících a splňovat požadavek normy 2,2 m² (1,1 x 2,0 m) na jednoho chodce. Obecně je v přestupních uzlech potřeba počítat s nahromaděním cestujících v jeden čas (obvykle při příjezdu vozidla k nástupišti), a právě na toto zatížení je potřeba navrhovat šířky komunikací pro pěší. Není žádoucí,

aby na nádražích vznikala místa, kde dochází k zmenšení prostoru určenému k chůzi, tento jev má pak za následek nahromadění lidí v jednom místě a negativně ovlivňuje plynulost pěšího provozu. Příkladem mohou být nevhodně umístěné informační tabule, stánky s občerstvením, lavičky nebo konstrukční prvky nosného systému.

6 ZÁVĚR

Při navrhování autobusového nádraží by měla existovat rovnocennost mezi autobusem a cestujícím, mezi autobusovým stáním a nástupištěm. Autobusová nádraží by se měla navrhovat pro lidi – jsou to cestující, kterým se dříve moc pozornosti nedostávalo. Právě cestující jsou ti, kteří si kupují jízdenky a jsou zákazníci autobusových nádraží. Návrh pěších komunikací je stejně důležitý jako návrh komunikací pro autobusy. Při správném návrhu autobusových stání je možné usnadnit přístup cestujícím na nástupiště.

Pro budoucí výzkum se nabízí otázka, jak správně posuzovat funkčnost autobusových nádraží. Je možné zkoumat například chování účastníků provozu na různých typech nádraží s ohledem na nehodovost, příjezdy autobusů, přístupy na nástupiště nebo posouzení efektivity návrhu počtu stání ku celkové ploše nádraží.

Článek nepochybně nevyčerpal všechny problémy autobusových nádraží, jako je například poloha a s ní spojená návaznost na linkovou dopravu (MHD, železnice), individuální automobilovou dopravu (parkoviště P+R a K+R), nebo napojení autobusového nádraží na cyklostezky a vytvoření zázemí pro cyklisty. Všem těmto tématům bych se rád věnoval v následujícím studiu.

Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen s podporou grantu juniorského specifického výzkumu Autobusová nádraží – cestující × vozidla × veřejný prostor (FAST-J-206501).

Použité zdroje

- [1] GEHL, Jan. Města pro lidi. Brno: Partnerství, o.p.s., 2012. ISBN 978-80-260-2080-6.
- [2] ČSN 73 6425 Autobusové, trolejbusové a tramvajové zastávky, přestupní uzly stanoviště. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [3] KOTAS, Patrik. Dopravní systémy a stavby. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03602-0.
- [4] PELC, Norbert. Autobusové nádraží ve variantě ŽUB A-Řeka. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební.
- [5] Transit capacity and Quality of service Manual: Bus transit capacity. Washington, 2003. TCRP REPORT 100. Dostupné z: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/docs/tcrp100/Part0.pdf>
- [6] ČSN 73 6110 Projektování místních komunikací. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [7] Bus Stop Design and Safety Guideline Handbook: Imperial County Transportation Commission. Southern California, 2014. Dostupné z: <http://www.imperialctc.org/media/managed/news/Final-2014-ICTC-Bus-Stop-Design-and-Safety-Guideline-Handbook.pdf>
- [8] VAIRA, Gromule and Irina YATSKIV (2007). Coach terminal as important element of transport infrastructure, Transport, 22:3, 200-206. ISSN 1648-3480. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/loi/tran20>

ÚROVEŇ KVALITY PĚŠÍ DOPRAVY V KONTEXTU STÁTŮ STŘEDNÍ EVROPY

PEDESTRIAN LEVEL OF SERVICE IN CONTEXT OF CENTRAL EUROPEAN COUNTRIES

Hana Kobzová^{*1}, Tomáš Efenberk¹

^{*}kobzova.h@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

V odborné společnosti začíná být stále častěji nahlíženo na multimodální plánování městské dopravy jako na možné řešení dopravních problémů. Pokud chceme zlepšovat podmínky pro chodce, musíme být schopni je i správně evaluovat. Článek shrnuje výstupy rešerše zaměřující se na přístupy k posuzování úrovně kvality pěší dopravy (ÚKPD), a to jak v odborné literatuře, tak v praxi – nastavením podmínek pro určování ÚKPD v předpisech vybraných středoevropských států. Článek tak poskytuje vhled do této problematiky a shrnuje rozdíly a příležitosti v této oblasti.

Klíčová slova

Úroveň kvality pěší dopravy, ÚKPD, ÚKD, pěší doprava, zařízení pro chodce, evaluace plánu udržitelné mobility, udržitelná doprava

Abstract

Traffic engineers are beginning to emphasize multimodal approaches to traffic planning as a way to deal with the challenges of traffic problems. If we want to improve conditions for pedestrians, we must also be able to evaluate them correctly. This paper summarizes the results of the research focusing on approaches to assessing the pedestrian level of services (PLOS), both in the literature and in practice - by setting the conditions for determining PLOS in the standards of Central European countries. The article thus provides insight into the said issue and summarizes differences and opportunities in this area.

Key words

Pedestrian level of service, PLOS, LOS, pedestrian, pedestrian facilities, evaluation of sustainable urban mobility plans, sustainable mobility

1 ÚVOD

V dopravním plánování se čím dál častěji objevuje myšlenka možného řešení dlouhodobých dopravních problémů v multimodálním principu. Evaluace a predikce dopravy se však zatím stále zaměřuje především na individuální automobilovou, popřípadě hromadnou dopravu. Pěší doprava bývá v tomto směru často opomíjena. Zatímco zjišťování a prokazování požadované úrovně kvality dopravy (ÚKD) vozidel je standardní součástí projektové přípravy výstavby nových nebo změn stávajících komunikací. Úroveň kvality pěší dopravy (ÚKPD) se při projektové přípravě standardně nejen že nezjišťuje, ale pro naplnění požadovaných limitů ÚKD vozidel často dochází k jejímu omezení například zrušením přechodu, zúžením chodníku pro přidání odbočovacího pruhu či jiným opatřením pro zvýšení plynulosti dopravy v hlavním dopravním prostoru. Metodika zjišťování ÚKPD je přitom v České republice součástí normy pro projektování místních komunikací, stejně tak tato norma udává minimální ÚKD pro vozidla na místních komunikacích.

Hlavní motivací k rešerši, jejíž výstupy jsou popsány v tomto článku, bylo zjistit, zda je přístup používaný v ČR srovnatelný s přístupy okolních států a jak se tyto přístupy liší od výstupů vědeckých studií. Jestli neexistuje možnost, jak ke stanovování ÚKPD přistupovat jednodušeji, nebo lépe tak, aby se stalo přirozenou součástí návrhu nových či rekonstruovaných stávajících dopravních staveb. Výstupy rešerše by mimo jiné mohly sloužit pro města a zpracovatele plánů udržitelné dopravy jako návod pro možnou evaluaci naplňování cílů v oblasti podpory a zkvalitňování pěší dopravy.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Vzhledem k tomu, že studiu ÚKPD se věnuje nemálo publikací, vzniklo již i několik rešerší shrnující dosavadní poznání v této oblasti. Žádná z dohledaných rešerší se však nevěnovala srovnání přístupů zanesených do norem a podobných předpisů využívaných v praxi obecně, a tedy ani konkrétně normami a předpisy používanými ve střední Evropě [1], [2], [3], [4], [5].

3 REŠERŠE ODBORNÝCH ČLÁNKŮ

Teorii stanovování ÚKPD se věnovalo již nemalý počet vědců a výzkumných skupin [1], [2], [3]. Obecně by se většina dosud popsaných přístupů stanovování úrovně kvality pěší dopravy dala rozdělit do dvou skupin. První skupina vychází z podobného přístupu, jako ÚKD pro vozidla a řeší především kvantitativní ukazatele, především pak základní ukazatele popisující dopravní proud tedy intenzitu, hustotu a rychlost. Naproti tomu druhá skupina zase řeší spíše kvalitativní ukazatele, a to například typ a kvalitu povrchu nebo návaznost infrastruktury pro pěší, přítomnost stromů, souvislost okolní zástavby, atraktivitu parteru a další kvalitativní ukazatele. V posledních letech se začaly objevovat snahy spojit posuzování ÚKD všech druhů dopravy do jednoho a vyhodnocovat tak výkonnost, a tedy i úroveň kvality dopravy na celé komunikaci takzvanou multimodální ÚKD [3]. Hlavním cílem tohoto souhrnu není popsat všechny známé metodiky, ale na pár příkladech demonstrovat základní principy různých přístupů ke stanovování ÚKPD.

Studie zaměřující se na kvantitativní ukazatele

Jedním z prvních a také nejvýznamnějších vědců, kteří se problematice stanovování ÚKPD věnoval byl americký vědec J. J. Fruin [1]. Fruin publikoval závěry svého výzkumu již v roce 1971 [6], kdy popsal přístup k posuzování ÚKPD založený na vztahu mezi plochou infrastruktury a intenzitou pěší dopravy. Fruin ve své studii vycházel ze základních vztahů mezi veličinami popisujícími dopravní proud (intenzita, hustota a rychlost). Na základě sledování časosběrných snímků, na kterých pozoroval chování lidí, jejich hustotu, rychlost a interakce, popsal a stanovil celkem šest stupňů ÚKPD od A po F. Nejlepší stupeň A, ohraničil plochou 3,25 m² na chodce a popsal ho jako pohyb při kterém si chodce může svévolně zvolit rychlost chůze, má dostatek prostoru k tomu obejít pomalejší chodce a vyhnout se křížení cesty nebo konfliktům s ostatními. Naopak nejhorší stupeň F omezil plochou 0,47 m² na osobu, kdy je při pohybu rychlost chodců výrazně ovlivněna ostatními, dochází k častému nevyhnutelnému kontaktu s ostatními osobami a pohyb v jiném směru, než se pohybuje dav, je prakticky nemožný [6].

Několik dalších studií, pak na Fruinovu teorii navázalo [2]. Za zmínku určitě stojí „*The Highway Capacity Manual (HCM)*“ [7]. Tento manuál se věnuje posuzování ÚKD všech druhů dopravy a svou metodiku pro stanovování ÚKPD založenou na Fruinově přístupu se snaží neustále vylepšovat. Principálně je metodika velmi podobná Fruinově metodě, mírně se liší hraniční hustoty pro jednotlivé stupně ÚKPD a v posledním vydání z roku 2016 se metodika zaměřila na dobu zdržení, kterou Fruin ve své metodice nezohledňuje [3].

Studie zaměřující se na kvalitativní ukazatele

Zatímco u kvantitativních metod zjišťování ÚKD se často jedná pouze o vylepšování a doplňování teoretického základu, který postavil Fruin, kvalitativní metody mají mezi sebou výraznější rozdíly [1], [2], [3].

Jako jeden z příkladů těchto přístupů může být uvedena metoda Sheily Sarkar z roku 1993 [8], ve které byly také rozřazeny úrovně kvality pěší dopravy do 6 skupin od A po F. Pro rozřazení mezi jednotlivými stupni však slouží slovní hodnocení následujících ukazatelů – bezpečnost, ochrana, pohodlí a komfort, kontinuita, logická konzistentnost a atraktivita. I zde je stupeň A nejlepší a očekává se na něm například kompletní segregace vozidel od pěší dopravy, kontrola bezpečnosti strážníky, či policisty, dostatek prostoru pro svobodný pohyb každého chodce a tak dále. Na opačném pólu je pak stupeň F, který je popsán jako místo, kde prakticky žádná infrastruktura pro chodce není, návrh takové ulice ignoruje bezpečnost chodců a ti se musí pohybovat mezi jedoucimi a zaparkovanými vozidly [6].

Jako další z kvalitativních metod může být zmíněna Gainesvillská metoda [9], která hodnotí ÚKPD podle bodového zisku v 6 kategoriích (existující infrastruktura pro chodce, konflikty, vybavenost, ÚKD motorových vozidel na přilehlé komunikaci, údržba a zajištění řízení poptávky po dopravě). Jednotlivé hranice pro zisk bodů jsou přesně popsány. Například v kategorii ÚKD motorových vozidel je bodový zisk pro stupeň ÚKD A–C 2 body, D 1 bod a E–F 0 bodů. Maximální možný zisk je 21 bodů a odpovídá ÚKPD A, bodový zisk pod 3 body pak odpovídá stupni F [9].

V neposlední řadě můžeme zmínit přístup Franka Jaskiewiczze [10], který svůj přístup postavil na kvalitě prostředí z architektonického (a urbanistického) pohledu. Vymezil 9 kritérií (uzavřenost průčelí, úroveň propojení komunikací, artikulace budov (zdali jsou budované spíše pro pěší provoz (typicky historická centra), nebo pro automobilní provoz (fasády s billboardy...), složitost prostoru z hlediska orientace, rozmanitost linií střech, bezpečnostní odstupy, stín stromů, možnost pohledu z veřejného prostranství do budov přes prosklená průčelí a stav komunikace pro pěší s ohledem na údržbu). Každé kritérium se pak hodnotí zvlášť na stupnici od 1 do 5, kdy 5 odpovídá výbornému stavu a 1 velmi špatnému. Na závěr je možné všechny výsledky zprůměrovat a převést na klasické hodnocení ÚKD pěší dopravy od A (v průměru 4–5 bodů) po F (1-1,5 bodu) [10].

Studie zaměřující se na multimodální přístup

V urbanizovaném prostředí je prostor pro realizaci dopravní infrastruktury vždy nějakým způsobem omezen a prostor pro opatření pro různé dopravní módy tak nelze rozšiřovat do nekonečna. Zaměřeni se na zlepšení ÚKD pro jeden dopravní mód tak logicky vede k zhoršení podmínek pro ostatní módy. Proto se v posledních letech několik výzkumníků zaměřilo na multimodální ÚKD. Cílem studií zaměřených na multimodální přístup je vynalézt univerzální měřítko, podle kterého by se dala posuzovat kvalita dopravy například na smíšených stezkách pro chodce a cyklisty nebo na městských třídách, na kterých je poptávka po kvalitní infrastruktuře pro všechny dopravní módy [3] [11] [4].

Metody stanovování multimodální ÚKD jsou většinou velmi komplikované a náročné na vstupní data [3] [11] [4]. Multimodální přístupy ke stanovování ÚKD by si zasloužily pozornost pro samostatnou rešerši, jejich zařazení v tomto článku je pouze pro doplnění kontextu. Pro představu o fungování multimodálních metod zde může být krátce představena alespoň HCM metoda z roku 2010. Ta posuzuje multimodální ÚKD na základě tří skupin vstupů – návrh infrastruktury (šířka, křížení a křižovatky, povrchy atd.), jízdní podmínky (zpoždění, střední rychlost, rychlostní limity, obsazenost parkování, nastavení SSZ atd.) a intenzita jednotlivých druhů dopravy a jejich provázání (např. zvýšení intenzity cyklistické dopravy, zvyšuje při společném provozu dobu zdržení automobilové dopravy atd.). Toto posouzení je velmi náročné na vstupní data (do výpočtu vstupuje více jak 40 indikátorů). Pro zjednodušení stanovení ÚKD byla vyvinuta aplikace, která však může pro mnohé dopravní inženýry působit jako "černá skříňka" [11] [4].

4 REŠERŠE PŘÍSTUPŮ ZANESENÝCH DO NOREM A PŘEDPISŮ STÁTŮ STŘEDNÍ EVROPY

Česká republika

Hodnocení ÚKPD se v ČR věnuje kapitola „Úroveň kvality komunikací pro chodce“ normy „ČSN 73 6110 Projektování místních komunikací“ [12]. Norma řeší ÚKPD na základě kvantitativních ukazatelů. Hranice pro jednotlivá ÚKPD jsou stanoveny průměrnou hustotou, rychlostí, výkonností a mimo to jsou i slovně popsány. Norma stanovuje tyto hranice jak pro průběžné komunikace pro pěší, tak i pro vyčkávací prostory (například v nároží křižovatky). Dále norma předepisuje minimální ÚKPD pro nově budované a rekonstruované chodníky, vyčkávacích prostory a zastávky. Zmíněná norma naopak nepředepisuje, pro jakou intenzitu má být ÚKPD zjišťováno a ani nedává návod k tomu, jak přistupovat k predikci pěší dopravy u nově budovaných komunikací [12].

Slovenská republika

I na Slovensku je přístup k posuzování ÚKPD zanesen do normy „STN 73 6110 Projektovanie miestnych komunikácií“ [13] a to konkrétně v kapitole 6 „Kapacita miestnych komunikácií“, která se dále odkazuje ve věci ÚKPD pěších na informativní přílohu D „Výpočet kapacity komunikácií pre chodcov“. Intenzita, pro kterou se stanovuje ÚKPD chodců má být převzata z prognostického modelu s výhledem na 15–30 let. Při kolísajících intenzitách se posuzuje maximální 2–15minutový úsek ze špičkové hodiny. ÚKPD se zjišťuje pro chodníky, přechody pro chodce (světelně řízené i neřízené), nároží křižovatek, schody a rampy a závisí na velikosti plochy v čase, hustotě pěších proudů a času potřebného na projití. Tyto ukazatele se vypočítávají podle předepsaného postupu, kdy se do výpočtu zohledňuje relativně velké množství indikátorů – od plochy poskytované chodcům se odečítají překážky, bezpečnostní odstupy atd., při rychlosti se uvažuje s účelem cesty, zohledňuje se sklon aj. a u intenzity se zase zohledňuje, zdali je pohyb převážně jednosměrný či obousměrný a určuje se tak specifická intenzita chodců, podle které se odečítá ÚKPD z grafu dle jednotlivých druhů infrastruktury [13]. Norma přímo nestanovuje minimální požadované úrovně ÚKPD, ale udává minimální výkonnost pro jednotlivou infrastrukturu.

Německo

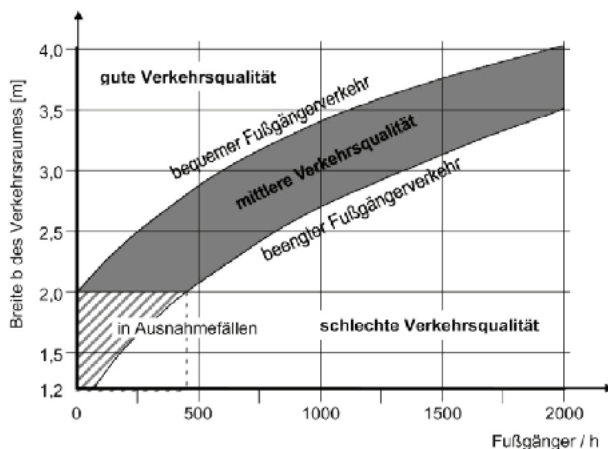
Navrhováním komunikací pro pěší se v Německu řídí normou „*Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen*“. Tato norma úroveň kvality pěší dopravy neřeší. Touto problematikou se zabývá předpis „*Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*“ [14]. Přístup popsán v této publikaci je prakticky stejný, jako ve slovenské normě. Také je založený na kvalitativních ukazatelích, intenzita se přepočítává na fiktivní intenzitu pomocí velmi podobného postupu jako na Slovensku. Podle fiktivní intenzity se z grafů odečítá příslušné ÚKPD. Metodika se využívá pro stejné typy dopravy jako na Slovensku. Rozdílem je, že rozhodující intenzita se bere pouze z nejzatíženějších 2 minut, a že graf pro stanovení ÚKD z fiktivní intenzity má benevolentnější hranici mezi stupni D a E [14], [13]. Norma v kapitole řešící ÚKPD přímo nepředepisuje, jak má být stanovena rozhodující dvouminutová intenzita, ani nedává návod, jak přistupovat k predikci pěší dopravy.
Poznámka: K rešerši byla poskytnuta pouze kapitola řešící ÚKPD „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“. Je tedy možné že návod k predikci pěší dopravy je popsán v jiné kapitole tohoto předpisu, ke které autoři neměli přístup.

Polsko

V Polsku si stanovují podmínky pro navrhování komunikací většinou města sama. Nadřazeným dokumentem, který by měl být platný pro všechna města je vyhláška „*Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie*“ [15]. Problematice navrhování komunikací pro pěší se věnuje kapitola 8 Chodníky, která se však přímo stanovováním ÚKD pro pěší nezabývá [15]. Při rešerši bylo poměrně obtížné najít město, které by posuzování ÚKD mělo ve svých předpisech zaneseno. Jednou z výjimek je Varšava, kde je ÚKD řešeno v dokumentu „*Rozwój ruchu pieszego w Warszawie*“ [16] z roku 2016 v části pokynů pro návrh a provádění. Metodika zjišťování ÚKD je zde převzata z „*Highway Capacity Manual*“ z let 2005 a 2010 a je popsána tabulkou, která vymezuje hraniční plochu na jednu osobu pro jednotlivé stupně ÚKD od A po F. Mimo to jsou v tabulce popsány hranice i slovně a obrázky. Pro standardní šířky chodníku jsou v předpisu přepočteny kritické hodinové intenzity pohybu pro jednotlivé stupně úrovně kvality dopravy. Dokument doporučuje ÚKD na chodnících na nových komunikacích maximálně C (výjimečně D) [16].

Rakousko

V Rakousku se navrhování komunikací pro pěší věnuje „*RVS 3.12 Nicht Motorisierter Verkehr – Fußgängerkehr*“ [17]. Tato norma přistupuje k posuzování úrovně kvality pěší dopravy pomocí grafu závislosti mezi intenzitou a šířkou komunikace pro pěší. Oblast grafu je rozdělena celkem do tří skupin ÚKD – dobrá, střední a špatná viz Obr. 1. Minimum, které by muselo být dodrženo na jednotlivých typech komunikací pro pěší není tímto předpisem stanoveno. Předpis také nestanovuje, pro jakou intenzitu má být daný graf použit a jak případně přistupovat k predikci pěší dopravy [17].



Obr. 1 Graf pro určování ÚKD pěších v Rakousku [17].

5 DISKUZE

Rešerše ukázala, že problematice stanovování ÚKPD bylo věnováno již poměrně hodně pozornosti. V historii bylo popsáno velké množství relativně rozdílných přístupů, které by se obecně mohly rozřadit mezi spíše kvantitativní a spíše kvalitativní metody hodnocení ÚKPD. V posledních letech se trend výzkumu začal orientovat na multimodální posuzování, kdy se řeší výkonost a úroveň kvality dopravy zároveň pro více dopravních módů, respektive pro všechny dopravní módy.

Při rešerši předpisů ve vybraných státech střední Evropy bylo zjištěno, že ÚKPD je alespoň nějakým způsobem řešena všude, i když v Polsku je toto zaneseno pouze na úrovni měst, a ne v každém městě se tato problematika řeší. Přístupy všech sledovaných států jsou založené na kvantitativních ukazatelích, vždy na vztahu mezi intenzitou chodců a poskytovanou plochou, což se dá přisuzovat tomu, že byly srovnávány metodiky zanesené do norem a normám podobným předpisům, které jsou většinou založeny spíše na kvantitativních principech. Zatímco německá a slovenská metodika je založená na komplikovanějších výpočtech, do kterých je zahrnuto množství koeficientů zohledňujících různé situace, v rakouské, české a polské metodice se ÚKPD stanovuje pouze na základě naměřené intenzity a šířky komunikace z tabulky, respektive z grafu. Otázkou je, zdali komplikovanější výpočet nevede spíše k zabztrahování problému a s tím spojenou větší náchylností na chybovost spojenou s nepochopením problematiky. Žádná z popsaných metod využívaných ve vybraných městech není takzvaně multimodální a neřeší ÚKD komplexně s ohledem na ostatní druhy dopravy. Problémem většiny metodik (vyjma slovenské) je, že nedávají návod k tomu, jak přistupovat k intenzitě pro kterou má být ÚKPD stanoveno, a to ani u stávajících komunikací, natož u nově budovaných (otázky predikce pěší dopravy).

6 ZÁVĚR

Článek shrnuje přístupy k posuzování ÚKPD v odborné literatuře a normách vybraných střeoevropských států. Zatímco rešerše odborné literatury dává vřled do poměrně různorodých přístupů ke stanovování ÚKPD založených spíše na kvantitativním či kvalitativním přístupu nebo snahy o zformulování univerzálního přístupu ke stanovování ÚKD pro všechny dopravní módy najednou, rešerše předpisů a norem vybraných střeoevropských států ukazuje, že popsané přístupy jsou poměrně podobné, založené vždy na kvantitativních ukazatelích. Rešerše dále ukázala, že přístup poskytovaný ČSN 73 6110 patří ve srovnání s předpisy okolních států k těm jednodušším. Otázku zhoršování ÚKPD kvůli zlepšování ÚKD by mohl vyřešit multimodální přístup k posuzování úrovně kvality dopravy, který je ovšem většinou komplikovaný a náročný na vstupní data a nelze ho tedy pravděpodobně požadovat u běžné projektové dokumentace. Toto téma by si však zasloužilo vlastní rešerši. Multimodální hodnocení ÚKD se zdá být dobrým řešením i pro evaluaci plánů udržitelné mobility. Pro pořizovatele a zpracovatele plánů udržitelné mobility může být zajímavým přístupem k evaluaci naplňování cílů v oblasti pěší dopravy i kvalitativní přístupy, které nejsou zaneseny do předpisů sledovaných států.

Poděkování

Výzkum vznikl za podpory juniorského specifického výzkumu FAST-J-20-6496.

Použité zdroje

- [1] Arunabha Banerjee, Akhilesh Kumar Maurya, Gregor Lämmel, „A review of pedestrian flow characteristics and level of service over different pedestrian facilities,“ July 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/326540620_A_review_of_pedestrian_flow_characteristics_and_level_of_service_over_different_pedestrian_facilities.
- [2] Nowar Raad, Matthew I. Burke, „What Are the Most Important Factors for Pedestrian Level-of-Service Estimation? A Systematic Review of the Literature,“ september 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/327381626_What_Are_the_Most_Important_Factors_for_Pedestrian_Level-of-Service_Estimation_A_Systematic_Review_of_the_Literature.
- [3] Kittelson & Associates, Inc. , „TOOLS FOR EVALUATING LEVEL & QUALITY OF SERVICE FOR ALL MODES: A LITERATURE REVIEW,“ August 2017. [Online]. Available: http://www.planhillsborough.org/wp-content/uploads/2015/07/Tools-for-Evaluating-Level-Quality-of-Service-for-All-Modes-A-Literature-Review_Final.pdf.
- [4] Muna Awatta, „Multimodal Level of Service (MMLOS) Preliminary Literature Review,“ January 2020. [Online]. Available: <https://ontario-traffic-council.s3.amazonaws.com/uploads/2020/02/MMLOS->

- Literature-Review_Final_Jan-2020.pdf.
- [5] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, „Multimodal Level of Service Analysis for Urban Streets,“ 2008. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/301771003>.
- [6] John J. Fruin, The Port of New York Authority, „DESIGNING FOR PEDESTRIANS: A LEVEL-OF-SERVICE CONCEPT,“ [Online]. Available: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1971/355/355-001.pdf>.
- [7] NYC DCP, „CURRENT HCM METHODOLOGY,“ 2006. [Online]. Available: https://www1.nyc.gov/assets/planning/download/pdf/plans/transportation/td_pedloschaptertwo.pdf.
- [8] SHEILA SARKAR, „Determination of Service Levels for Pedestrians, with European Examples,“ [Online]. Available: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1993/1405/1405-006.pdf>.
- [9] Linda B. Dixon, „Bicycle and Pedestrian Level-of-Service Performance Measures and Standards for Congestion Management Systems,“ January 1996. [Online]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0361198196153800101>.
- [10] FRANK JASKIEWICZ, „Pedestrian Level of Service Based on Trip Quality,“ 2000. [Online]. Available: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec019/Ec019_g1.pdf.
- [11] Herbie Huff, Robin Liggett, „The Highway Capacity Manual’s Method for Calculating Bicycle and Pedestrian Levels of Service: the Ultimate White Paper,“ 2014. [Online]. Available: <https://www.lewis.ucla.edu/wp-content/uploads/sites/2/2014/09/HCM-BICYCLE-AND-PEDESTRIAN-LEVEL-OF-SERVICE-THE-ULTIMATE-WHITE-PAPER.pdf>.
- [12] ČSN 73 6110 Projektování místních komunikací, Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [13] STN 73 6110 Projektovanie miestnych komunikácií, Slovenský ústav technickej normalizácie, 2004.
- [14] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, 2001.
- [15] „Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie,“ [Online]. Available: <https://www.arslege.pl/rozporzadzenie-ministra-transportu-i-gospodarki-morskiej-w-sprawie-warunkow-technicznych-jakim-powinny-odpowiadac-drogi-publiczne-i-ich-usytuowanie/k360/s4504/>.
- [16] „Rozwój ruchu pieszego w Warszawie - Wytyczne projektowania i wykonywania,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.siskom.waw.pl/piesi.htm>.
- [17] RVS 3.12 NICHT MOTORISIERTER VERKEHR - Fußgängerverkehr, Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr, 2004.
- [18] FIS Forschungs-Informations-System, „Qualitätsindikatoren für die Infrastruktur des Fußgängerverkehrs,“ [Online]. Available: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/231933/>.

ANALÝZA MOBILITY V MESTE Z HĽADISKA VYHODNOTENIA MULTIMODÁLNYCH KRITÉRIÍ

ANALYSIS OF MOBILITY IN THE CITY FROM THE POINT OF VIEW OF THE EVALUATION OF MULTIMODAL CRITERIA

Jakub Takács^{*1}

* jakub.takacs@stuba.sk, tel.: +421 917 384 403

¹ Katedra dopravných stavieb, SvF STU, Slovensko

Abstrakt

Výstupy dopravných prieskumov sú kvalifikovane analyzované a slúžia ako podklad pre navrhovanie konkrétnych riešení v oblasti dopravnej infraštruktúry alebo dopravných služieb. Výsledok týchto činností sa potom aplikuje do územnoplánovacej dokumentácie, konkrétne do všeobecného územného plánu mesta. Základným zdrojom údajov pre dopravné analýzy na zlepšenie dopravy sú dopravné prieskumy zamerané na parkovanie, smerovanie v križovatkách, ako aj prieskumy obsadenosti verejnej dopravy a prieskumy v domácnostiach. Anketové dopravné prieskumy domácností skúmajú mieru mobility - dopravné vzťahy medzi jednotlivými zónami v meste, respektíve susednými vonkajšími zónami. V príspevku sú uvedené skúsenosti z prípravy a realizácie dopravných prieskumov v jednom malom slovenskom meste.

Klíčovú slova

Mobilita, doprava, dopravný prieskum, anketový dopravný prieskum domácností

Abstract

The outputs of traffic surveys are qualifiedly analysed and serve to be base for proposing specific solutions in the area of transport infrastructure or transport services. The result of these activities is then applied in the land-use planning documentation, specifically in the general master plan of a city. The basic sources of data for traffic analyses, in order to improve transport, are traffic surveys focused on parking, routing in junctions as well as the surveys of public transport occupancy and household inquiry surveys. The household inquiry surveys examine the degree of mobility - transport relations between individual zones in the city, respectively adjacent outer zones. Experiences from the preparation and realization of the traffic surveys in one small Slovak town are written in the contribution.

Key words

Mobility, transport, traffic survey, household inquiry surveys

1 ÚVOD

Pre túto štúdiu sme si vybrali mesto Šaľa, ktoré má spolu so svojou aglomeráciou až 30 000 obyvateľov. Mesto leží v juhozápadnej časti Slovenska. Terén mesta je rovinatý, čo predurčuje nárast alternatívnych dopravných prostriedkov (napríklad cyklistiky). Do väčších miest ako Bratislava, Nitra, Trnava, Nové Zámky a Dunajská Streda sa dostanete do 60 minút. Táto blízkosť umožňuje obyvateľom každodenne dochádzať za prácou / školou do týchto miest, čo vedie k zvýšenej mobilite dopravy. Popri iných rôznych dopravných analýzach sa v meste Šaľa uskutočnil anketový dopravný prieskum [1] zameraný na zlepšenie dopravy. Výstupy tohto prieskumu majú slúžiť ako vstupné údaje pre vytvorenie projektovej časti dopravného generelu mesta. Prieskum sledoval mieru mobility-dopravné vzťahy medzi jednotlivými zónami v rámci mesta Šaľa, respektíve susedné vonkajšie zóny-blízke obce. Za týmto účelom bolo na vytvorenie anketového dopravného prieskumu použitých niekoľko nástrojov dopravného inžinierstva. Implementovalo sa niekoľko rôznych metód, hlavne z dôvodu zlyhania niektorých z metód použitých na získanie potrebného počtu vyplnených dotazníkových listov. V prvom prípade bolo distribuovaných 10 000 dotazníkových listov, a to prostredníctvom miestnych novin distribuovaných do každej domácnosti v meste Šaľa a priľahlých obciach (Diakovce, Dlhá nad Váhom, Kráľová nad Váhom). Očakávaná miera návratnosti

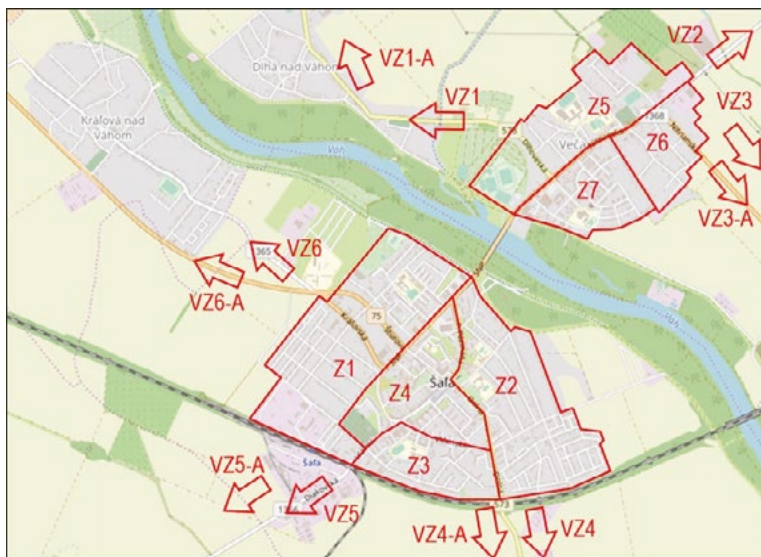
prieskumných listov mala byť 10 %, čo by predstavovalo 1 000 prieskumných listov na 26 893 obyvateľov. Táto metóda bola neúspešná a boli uskutočnené ďalšie metódy, ktoré sú predmetom tohto príspevku.

Na rozpracovanie zásad dopravnej politiky mesta je potrebné vykonať niekoľko dopravných prieskumov, ktorých výstupy sa kvalifikovane analyzujú a následne sa používajú na navrhovanie konkrétnych riešení v oblasti dopravnej infraštruktúry alebo dopravných služieb [2]. Súbor týchto činností sa potom aplikuje v územnoplánovacej dokumentácii, konkrétne v územnom pláne dopravy mesta [3], [4], [5]. Špeciálne podrobnosti o prieskumoch verejnej dopravy sú známe v [6].

2 METODIKA PRIESKUMU

Mesto Šaľa spoločne s mestskou časťou Veča sa pre potreby vyhodnotenia anketového dopravného prieskumu rozdelili na 7 vnútromestských zón. Pre podrobnú analýzu hybnosti nielen medzi zónami v meste Šaľa, ale aj medzi okolitými obcami, sa vytvorili vonkajšie zóny. Tieto zóny pozostávajú z blízkych vonkajších zón a vzdialených vonkajších zón. Do blízkych vonkajších zón patria obce ležiace v aglomerácii mesta Šaľa. Svojou polohou sa nachádzajú na cestách, ktoré vstupujú do mesta Šaľa alebo mestskej časti Veča. Medzi vzdialené vonkajšie zóny patria skupiny miest, do ktorých obyvatelia Šale najčastejšie cestujú (Obr. 1). Zóna VZ – Dlhá nad Váhom, VZ1-A – Trnava VZ2 – Močenok, VZ3 – Trnovec nad Váhom, VZ3-A – Nitra, Nové Zámky, VZ4 – Vlčany, VZ4-A – Komárno, VZ5 – Diakovce, VZ5-A – Dunajská Streda, VZ6 – Kráľová nad Váhom, VZ6-A – Galanta, Bratislava.

Pre potreby realizácie anketového dopravného prieskumu sa vytvorili anketové hárky v papierovej a elektronickej podobe. Pre prvotný spôsob distribúcie anketových hárkov sa po dohode s mestom zvolil miestny časopis, do ktorého sa vložil anketový hárok. Súčasne bol na internetovej stránke mesta zverejnený dotazník, ktorý si mohli obyvatelia stiahnuť, vyplniť a následne odovzdať na podateľni mestského úradu alebo odfoťiť a poslať na uvedenú emailovú adresu. Takýmto spôsobom sa získalo menej ako 10 hárkov. Počas mesiaca máj a jún 2019 prebiehala aj mediálna reklama na internetovej stránke mesta Šaľa, prostredníctvom sociálnych sietí a rovnako aj v lokálnej televízii TV Krea. Kvôli veľmi malému množstvu odovzdaných hárkov od obyvateľov sa v mesiaci september 2019 zvolil nový spôsob distribúcie hárkov. Oslovili sa školy na území mesta, stredné školy však spoluprácu, cez ich studentov, odmietli. Rozdalo sa približne 2400 anketových hárkov do všetkých základných škôl v meste Šaľa. Zo základných škôl bola návratnosť približne 450 vyplnených hárkov. Celkový počet odovzdaných a vyplnených hárkov bol 513. Návratnosť dotazníkov zo základných škôl dosiahla 18,75%.



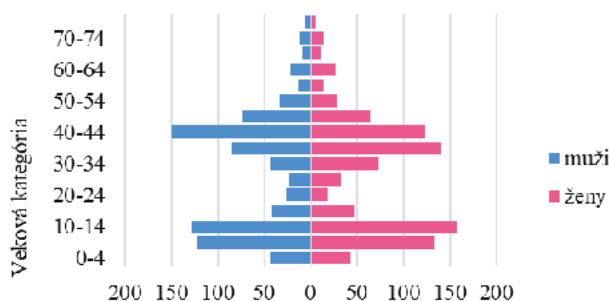
Obr. 1 Rozdelenie územia na zóny.

3 VÝSLEDKY

Vyhodnotenie sociálno-demografickej časti

Pre potreby spracovania anketového dopravného prieskumu sa podarilo vyzbierať údaje z 513 domácností. V porovnaní s celkovým počtom domácností v meste Šaľa 7905, sa dosiahla vzorka 6,49 %. Anketové hárky vyplňali viac ženy ako muži, v počte 935 oproti 826. Prieskum sa realizoval ako anonymný, no aj napriek tomu ostávalo veľa otázok v hárku nevyplnených. Najviac nevyplnených údajov vzniklo pri otázke mesačného príjmu na celú rodinu. Najviac domácností, v počte 238, dosahuje mesačný príjem do 2000 €. Najmenšie percento zastúpenia, len 20 domácností, má mesačný príjem menší ako 500 €.

Vekové zloženie je výrazne ovplyvnené tým, že väčšina vyplnených hárkov pochádza zo základných škôl. Najväčšie zastúpenie vekového zloženia je v rozmedzí 35 - 49 ročných u dospelých a od 5 - 14 ročných u detí. Pre nedostatočný počet odovzdaných hárkov od respondentov z vekových skupín od 20 do 35 rokov a 60 a viac rokov, tieto skupiny výrazne chýbajú vo vyhodnotení anketového prieskumu (Obr. 2).



Obr. 2 Strom vekových skupín podľa dotazníka.

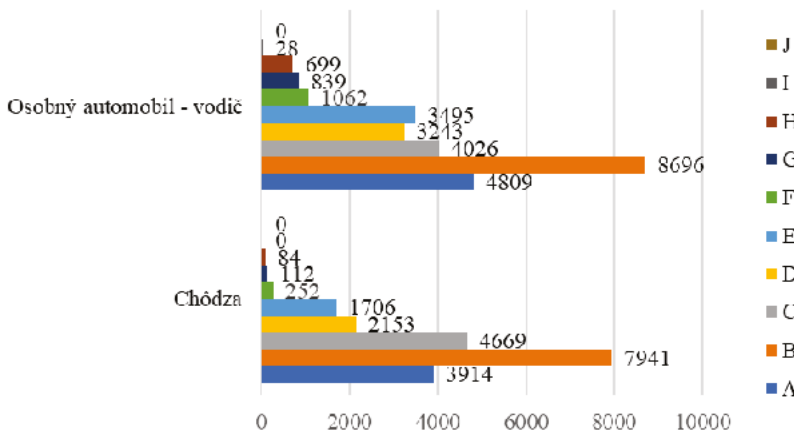
Vyhodnotenie hybnosti

Pri vyhodnotení hybnosti sa vychádzalo z demografických údajov mesta Šaľa a z počtu jazd medzi zónami. Mesto Šaľa sa rozdelilo na 4 samostatné zóny, rovnako aj mestská časť Veča na 3 zóny. V blízkosti mesta, v jej aglomerácii, vznikli blízke vonkajšie zóny. Cesty, ktoré sa vykonávali do vzdialenejších oblastí sa rozdelili do samostatných vzdialených vonkajších zón. Po analýze vykonaných jazd, ktoré respondenti napísali do anketových hárkov, sa zistil počet jazd medzi jednotlivými zónami. Tieto jazdy boli následne prepočítané podľa priemernej jazdy vyplývajúcej z anketového hárku na jednotlivé zóny na súčasný počet obyvateľov v jednotlivých zónach.

Pri určovaní jednotlivých charakteristík jazd, sa určil časový interval (Tab. 1), podľa ktorého sa zaraďovali jednotlivé jazdy do časových intervalov. Jednou z charakteristík, ktorá sa zisťovala pri vyhodnocovaní jazd, je čas potrebný na vykonanie jazdy v závislosti od dopravného prostriedku. Pri ceste autobusom, obyvatelia najviac strávia cestu v časovom intervale 15 až 20 minút (25,81 %), čo zodpovedá linke MHD prípadne trasy medzimestských liniek do okolitých dedín. Cyklistom a chodcom najčastejšie trvá cesta v časovom intervale 5 až 10 minút (Obr. 3). U cyklistov to predstavuje 38,68% a u chodcov 38,12%. Respondenti vykonávajúci jazdu autom najčastejšie uviedli ako dĺžku svojej jazdy hodnotu v intervale 5 až 10 minút (32,33 %). Nezanedbateľná hodnota je aj v časovom intervale 0 až 5 minút (17,88 %) (Obr. 3). Pri ceste vlakom je to časový interval 45 až 60 minút (36,96 %), čo predstavuje cestu vlakom do Bratislavy.

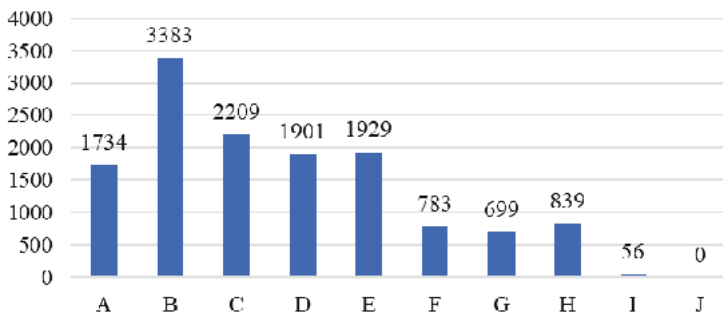
Tab. 1 Časové intervaly jász.

Označenie	Časový interval	Označenie	Časový interval	Označenie	Časový interval
A	0:00-0:05	D	0:15-0:20	G	0:45-1:00
B	0:05-0:10	E	0:20-0:30	H	1:00-2:00
C	0:10-0:15	F	0:30-0:45	I	2:00-8:00
				J	8:00-24:00



Obr. 3 Chôdza a osobný automobil; rozdelenie jász do časových intervalov-chôdza a osobný automobil (vodič).

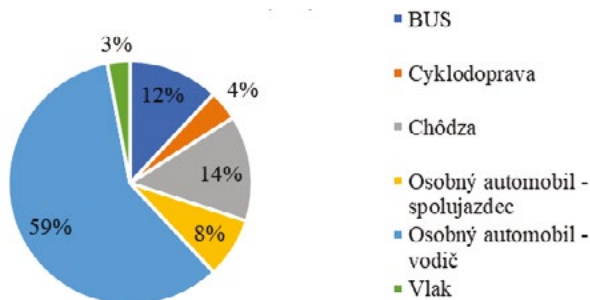
Druhou kombináciou je porovnanie účelu jazdy respondentov s časovým trvaním jazdy za cieľom. Pri dochádzaní na detský krúžok trvá jazda najčastejšie od 5 do 10 minút (39,08 %). Za prácou najčastejšie dochádzajú 5 až 10 minút - 25 % (Obr. 4). Za službami, do školy a za zábavou je to taktiež interval 5 až 10 minút. Treťou kombináciou je porovnanie účelu jazdy a použitia dopravného prostriedku. Pri dochádzaní za prácou obyvatelia najčastejšie využívajú osobný automobil - 67 % (Obr. 5). Za každou funkciou okrem školy, prevláda dopravný prostriedok automobil. Do školy najčastejšie obyvatelia dochádzajú pešo - 49 %.



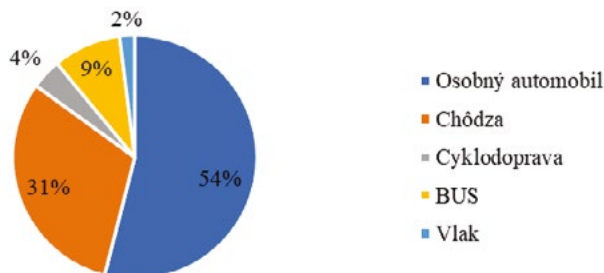
Obr. 4 Rozdelenie jász do časových intervalov podľa účelu – práca.

Po prepočítaní počtu jász na počet obyvateľov v jednotlivých zónach sa rozdelili tieto jazdy percentuálne podľa použitého dopravného prostriedku. Najväčšie zastúpenie má osobný automobil, kde respondent figuroval buď ako vodič, alebo ako spolujazdec, pričom tento spôsob tvorí 53,6 % z celkového dopravného prúdu. Druhou najväčšou skupinou sú chodci. Tí tvoria 31 %. Toto číslo ale môže byť ovplyvnené aj prostredím, v ktorom sa anketové hárky distribuovali. Ostatné prostriedky sú zastúpené výrazne menej – autobus 9 %, bicykel 4,4 % a vlak 2 % (Obr. 6).

Pre porovnanie, počet jász autobusom v časovom intervale do 20 min, čo predstavuje jazda MHD alebo do blízkych obcí, sa zhoduje s počtom jász z prieskumu MHD a prímestských línií s odchýlkou menšou ako 1 %.



Obr. 5 Rozdelenie využívania dopravných prostriedkov pre účel – práca.



Obr. 6 Celkové zloženie dopravného prúdu.

Po analýze a prepočítaní jász sa vytvorila matica medzioblastných vzťahov (Obr. 7). Pre účely tohoto príspevku sa vonkajšie zóny zlúčili do jednej zóny označenej ako "I". Toto zlúčenie neumožňuje znázornenie tranzitnej dopravy, zobrazuje iba hodnotu sčítania tranzitnej dopravy (1062 jász) a dopravy vo vnútri vonkajšej zóny (616 jász). Matica je farebne rozdelená podľa typu jazdy. Žltá farba predstavuje vnútrozónálne jazdy. Modrá farba predstavuje zdrojovú dopravu a oranžová farba zase cieľovú dopravu. Jazdy medzi jednotlivými zónami sú vyobrazené zelenou farbou. Najmenej zatážená zóna je zóna Z6, ktorú tvorí individuálna bytová zástavba.

	I	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
I	1678	2796	1678	1342	1566	1007	84	1566
Z1	2880	3886	1957	755	2377	895	140	1258
Z2	1622	2349	4250	895	1510	419	28	252
Z3	1258	699	979	587	839	168	0	196
Z4	1398	2293	1594	839	1314	671	140	587
Z5	1090	895	447	140	615	1035	140	1426
Z6	84	140	28	0	140	140	56	336
Z7	1734	1007	419	168	475	1454	336	4110

Obr. 7 Matica medzioblastných vzťahov.

4 ZÁVER

Potreba riešiť udržateľnú mobilitu sa dostáva čoraz častejšie z väčších miest do okolitých menších miest. Menšie mestá vytvárajú dopravné satelity krajským mestám a produkujú veľa zdrojových a cieľových jazd. S už početnou tranzitnou dopravou vytvárajú v mestách počas dopravnej špičky v ranných a poobedňajších hodinách hustú premávku v meste. Do popredia sa postupne začínajú dostávať ekologickejšie druhy dopravy, ako napríklad cyklo doprava, MHD, vlaková doprava a pešia doprava.

Dôležitým prvkom na analýzu hybnosti je samotný zber dát. Zber dát v meste Šaľa ukázal nízky záujem obyvateľov o poskytnutie údajov. Aj napriek dostatočnej mediálnej kampani - reklamný spot primátora mesta v miestnej televízii, rozvoz anketových hárkov v miestnom časopise do 10 000 domácností, reklama na lokálnych sociálnych sieťach; sa vrátil veľmi nízky počet vyplnených anketových hárkov. Na zistenie hybnosti celého mesta a príslušných obcí by bol manuálny zber dát dotazovaním sa priamo na ulici časovo a finančne veľmi náročný, preto tento spôsob mesto neodsúhlasilo. Samotná analýza dát ukázala prevahu využívania osobného automobilu pri všetkých účeloch dopravy. Pri niektorých účeloch dosiahla vyššiu hodnotu pešia doprava, čo dokazuje dobré pokrytie územia funkciami (základné školy, obchody, služby). Zaujímavým údajom je podiel cyklickej dopravy, len 4 %. Aj napriek tomu, že mesto leží na rovine a v posledných rokoch aj teplejšie zimné mesiace vytvárajú ideálne podmienky na takmer celoročné využívanie bicyklov.

Na zvýšenie návratnosti anketových hárkov pri ďalších anketových prieskumoch je potrebné zvážiť zmenu získavania dát z papierovej formy na elektronickú. Vytvorením elektronického formulára alebo aplikácie sa znížia náklady na tlač a umožní sa neobmedzená distribúcia. Dôležitou súčasťou bude spolupráca mesta a miestnych organizácií pri propagácii, rovnako aj spolupráca väčších zamestnávateľov a vzdelávacích inštitúcií na zabezpečenie zberu dát. Samotní anketári by boli vybavení tabletmi, do ktorého by vyplňali údaje od respondentov.

Použité zdroje

- [1] SCHLOSSER, T. – TAKÁCS, J. – BRANIŠ M. – SCHLOSSER, Mi. a kol.: Anketový dopravný prieskum na území mesta Šaľa - Dopravný prieskum domácností a verejnej dopravy, Katedra dopravných stavieb, SvF STU Bratislava – DOTIS Consult, s.r.o., 2019
- [2] HEGYI, S. – SCHLOSSER, P. – SCHLOSSER, T. – SCHLOSSER, M.: Analýza dopravnej situácie na príjazdových komunikáciách mesta Šaľa, profilový dopravný prieskum, Dopravná štúdia, DOTIS, s.r.o. – HELDIS, s.r.o., 2018
- [3] SCHLOSSER, T. – HODÁKOVÁ, D. – SCHLOSSER, M. a kol.: Dopravný prieskum smerovania dopravy na území mesta Šaľa, Katedra dopravných stavieb SvF STU Bratislava – DOTIS Consult, s.r.o., 2018
- [4] SCHLOSSER, T. – SCHLOSSER, P. a kol.: Dopravný prieskum parkovania na území mesta Šaľa - Dopravná štúdia, DOTIS Consult, s.r.o. - Katedra dopravných stavieb SvF STU Bratislava, 2018
- [5] SCHLOSSER, T.: Dopravno-kapacitné posúdenia v projektovej dokumentácii cestného a mestského inžinierstva, In: Cestná konferencia 2018
- [6] BRANIŠ, M. - SCHLOSSER, T. - CÁPAYOVÁ, S. - ZUZULOVÁ, A. - HODÁKOVÁ, D.: Methodology of collecting data for evaluating public transport services. In WMCAUS 2019 [elektronický zdroj] : abstract collection book of the World Multidisciplinary Civil Engineering - Architecture - Urban Planning Symposium. Prague, 2019

DETEKCE PŘÍTOMNOSTI R-MATERIÁLU V ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH S VYUŽITÍM METODY POSTUPNÉ EXTRAKCE ASFALTOVÉHO POJIVA

DETECTION OF THE PRESENCE OF RAP IN ASPHALT MIXTURES USING THE METHOD OF STAGED EXTRACTION OF ASPHALT BINDER

Jiří Sachr^{*,1}

*Jiri.Sachr@vutbr.cz

¹Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Práce se zabývá detekcí přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi a sleduje kvalitu promísení nového asfaltového pojiva spolu s pojivem zestárlym. Z metodologického hlediska je snaha optimalizovat dostupné zkušební metody umožňující detekovat přítomnost R-materiálu v asfaltových směsích tak, aby bylo rovněž možno spolehlivě určit podíl dávkovaného R-materiálu ve směsích, u kterých byl tento materiál odhalen. Pro tento účel byly vybrány empirické zkušební metody stanovující penetraci jehlou a bod měknutí asfaltového pojiva získaného pomocí postupné extrakce.

Klíčová slova

Postupná extrakce asfaltového pojiva, penetrace jehlou, bod měknutí, detekce R-materiálu, R-materiál, kvalita promíchání

Abstract

The work deals with the detection of the presence of RAP (reclaimed asphalt pavement) in the asphalt mixture and monitors the quality of mixing of the new asphalt binder together with the aged binder. From a methodological point of view, an attempt is made to optimize the available test methods for detecting the presence of RAP in asphalt mixtures so that it is also possible to reliably determine the proportion of dosed RAP in mixtures in which this material was detected. For this purpose, empirical test methods were selected to determine needle penetration and softening point of asphalt binder obtained by staged extraction.

Key words

Staged extraction of asphalt binder, needle penetration, softening point, RAP detection, RAP, mixing quality

1 ÚVOD

V současnosti se klade čím dál větší důraz na snižování emisí a celkovou ochranu životního prostředí. Svědčí o tom například Kjótský protokol [1] nebo Pařížská dohoda [2], ve kterých se průmyslové země zavazují ke snížení emisí skleníkových plynů. Šetrnost k životnímu prostředí se ale zdaleka netýká jen emisí průmyslových plynů. Každá stavba, ať už lokální či liniová, musí vyhovět požadavkům životního prostředí. Zvláštní pozornost se věnuje recyklacím již použitých materiálů. V minulosti byl vyfrezovaný materiál z asfaltových vrstev krytů vozovek považován za odpad, a tak s ním také bylo nakládáno. Tento materiál byl skladován na hromadách různých stavebních skládek, kde podléhal působení vlivů okolního prostředí, například klimatickým změnám.

V dnešní době se na již jednou použitý materiál nepohlíží jen jako na odpad. Recyklaty se staly plnohodnotným stavebním materiálem. Nejen, že šetří zdroje nerostných surovin, jako jsou například ropa, kamenivo a podobně, ale také se významně projevují v ekonomické náročnosti staveb, kde snižují celkové náklady stavby.

Aby však mohly recyklaty poskytovat výhody plnohodnotných stavebních materiálů, musí s nimi také být dostatečně správně zacházeno. Co se týče asfaltových recyklátů, je Česká republika ve srovnání s Německem či Rakouskem stále pozadu. Pomineme-li rozdílné skladování těchto materiálů, pak zde rovněž chybí například dokumentace původu R-materiálu. Asfaltový recyklát z podkladní vrstvy bude mít jiné vlastnosti než recyklát

z vrstvy obrusné. Stejně tak R-materiál získaný z vrstev typu SMA (asfaltový koberec mastixový) bude odlišný od R-materiálu získaného z vrstev obsahujících směs typu ACO (asfaltový beton pro obrusné vrstvy), nebo dokonce ACP (asfaltový beton pro podkladní vrstvy).

Příspěvek se zabývá postupnými extrakcemi asfaltového pojiva z asfaltových směsí obsahujících různé množství dávkovaného R-materiálu. Pomocí empirických zkoušek znovuzískaných asfaltových pojiv se hodnotí kvalita promísení nového asfaltového pojiva s pojivem obsaženým v R-materiálu. Tímto postupem je za určitých okolností možné zjistit přítomnost R-materiálu v asfaltových směších.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

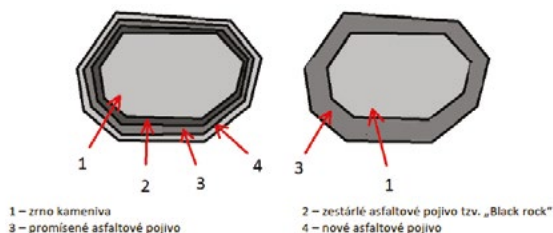
Snaha o využití druhotných materiálů při rekonstrukci již nevyhovujících dopravních komunikací přispívá k tomu, aby tato problematika byla podrobně řešena. Stav silniční sítě v České republice vyžaduje vysoké investice vynaložené do oprav především silnic 2. a 3. tříd, kterých je v celkovém počtu nejvíce a které zároveň spadají do technicky nejhoršího stavu [3]. Využití recyklace přináší kromě ekologických výhod také nezanedbatelný finanční přínos v podobě snížení nákladů potřebných pro rekonstrukci.

V případě nesprávných postupů výroby či samotné pokládky recyklované směsi se mohou projevit oproti převážně pozitivním výsledkům i negativní aspekty vedoucí v krajním případě až ke snížení celkové životnosti netuhé vozovky. Proto je tedy velmi důležité dbát technických a obecně známých návrhových pravidel [4].

Dá se předpokládat, že pojivo obsažené v R-materiálu je obvykle značně zestárlé s výrazně vyšší tuhostí oproti nově použitému pojivu. Vlastnosti pojivové složky se projevují na konečných funkčních vlastnostech asfaltové směsi. Výsledný materiál má tedy vyšší tuhost, což pozitivně ovlivňuje jeho odolnost vůči deformacím, avšak na druhé straně asfaltová vrstva může být náchylnější ke vzniku trhlin. Z těchto důvodů je zapotřebí k návrhu asfaltových směsí s R-materiálem přistupovat zodpovědně a vlastnosti R-materiálu využívat správně [5].

Metoda postupné extrakce asfaltového pojiva je inovativní metoda, která rozšiřuje standardní extrakci. Použití této rozšířené varianty extrakce pojiva ze směsi je vhodné především u směsí obsahujících R-materiál. Ideálním stavem výroby asfaltové směsi obsahující R-materiál je docílení maximálního smísení nově přidaného asfaltového pojiva s pojivem obsaženým v R-materiálu (viz Obr. 1 – pravá část). Docílení tohoto stavu je však obtížné a ve směsi vzniká převážně tzv. „double coating“ (viz Obr. 1 – levá část). Nově přidané pojivo se s pojivem obsaženým v R-materiálu smísí jen částečně a vytvoří tak mezivrstvu oddělující zestárlé pojivo obalující samotné zrno kameniva od měkkého pojiva na povrchu této struktury. Postupnou extrakcí a následnou destilací tedy získáme pojivo ze všech zón a porovnáním jejich empirických a reologických vlastností jsme schopni detekovat přítomnost a míru „double coatingu“. Na základě těchto výsledků jsme schopni stanovit optimální podmínky míchání asfaltové směsi, které budou pravděpodobně pro každý typ směsi jiné [6].

V důsledku různé výstupní teploty se může lišit i celková výsledná tloušťka asfaltového filmu u původních zrn R-materiálu a nativního kameniva.



Obr. 1 Vrstvená struktura pojiva ve směsi s R-materiálem (vlevo) a bez R-materiálu (vpravo).

3 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

K porovnání vlastností asfaltových pojiv obsažených v asfaltových směších s různým množstvím dávkovaného R-materiálu bylo zapotřebí provést zkoušky, jejichž prováděcí postup je podrobně popsán níže v textu.

Postupná extrakce asfaltu a odstranění nerozpustného materiálu

Vzorek asfaltové směsi o hmotnosti (1500 ± 50) g se rozdrolí tak, aby se zamezilo shlukování zrn a tím se usnadnilo rozpouštění asfaltového pojiva. Směs se následně vsype do síťovaného koše a ten se postupně vkládá do tří předem

připravených nádob s rozpouštědlem. Jako rozpouštědlo je použit tetrachlorethylen. Vždy je nutné dbát na to, aby byla veškerá asfaltová směs zcela ponořena v rozpouštědle. V první nádobě se pojivo extrahuje po dobu 1 minuty. Druhá extrakce pak trvá 2 minuty a konečná extrakce probíhá 45 minut, přičemž dochází k téměř úplnému omytí asfaltového pojiva z povrchu kameniva. Na povrchu některých zrn kameniva pak zůstává už jen tzv. black rock, což jsou nerozpustné zbytky pojiva "přípečené" ke kamenivu. Asfaltový roztok ze všech tří nádob se nechá nejméně 10 minut stát a poté se proleje přes síto 0,063 mm do laboratorní odstředivky. Zde dochází po dobu (25 ± 5) minut a při zrychlení nejméně $15\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ k odstranění veškerých nerozpustných částic.

Destilace asfaltového pojiva dle ČSN EN 12697-3

Roztok extrahovaného pojiva a rozpouštědla se nasaje do destilační baňky, která je ponořena v olejové lázni a rotuje rychlostí (75 ± 5) otáček za minutu. Destilace probíhá ve třech fázích. V první fázi je teplota olejové lázně $110\text{ }^\circ\text{C}$ a tlak v destilační baňce 40 kPa. V druhé fázi se teplota zvýší na $160\text{ }^\circ\text{C}$ a tlak sníží na 2 kPa. V poslední fázi se teplota zvýší na $180\text{ }^\circ\text{C}$, přičemž destilace končí, jakmile je tato teplota dosažena. Tlak v destilační baňce se pomalu zvýší až na tlak atmosférický. Vydestilované pojivo se přejeze z destilační baňky do vhodné nádoby a připraví se zkušební vzorky pro následné zkoušky asfaltových pojiv [7].

Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426

Asfaltové pojivo se nalije do penetrační misky, která se umístí do vodní lázně o teplotě $25\text{ }^\circ\text{C}$. Temperace ve vodní lázni probíhá minimálně 2 hodiny. Penetrační miska se vzorkem se následně umístí do přenášecké misky, která byla umístěna v lázni s analytickými vzorky. Přenášecká miska se naplní vodou z lázně s řízenou konstantní teplotou tak, aby byla penetrační miska zcela pod vodou. Přenášecká miska se umístí na podstavec penetrometru a zkontroluje se, zda nedošlo vlivem přenašení ke změně teploty vody. Do penetrometru se připevní penetrační jehla a pomalu se snižuje, až se její hrot právě dotkne svého odrazu odraženého povrchem analytického vzorku. Zkontroluje se a zaznamená nulová pozice jehly, pak se rychle uvolní držák jehly a ta je po dobu 5 s při zatížení $(100,0 \pm 0,1)$ g zatlačována do vzorku asfaltového pojiva. Provedou se nejméně tři platná měření na místech povrchu analytického vzorku, která jsou vzdálená nejméně 10 mm od stěny penetrační misky a nejméně 10 mm od sebe. Pro každé měření se použije nová jehla. Jestliže nejsou 3 měření stanovená do 2 minut, vrátí se analytický vzorek a přenašecká miska do vodní lázně a měření se opakuje [8].

Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička dle ČSN EN 1427

Asfaltové pojivo se nalije do speciálních kroužků a nechá se vychladnout. Po ztuhnutí pojiva se horkou špachtlí seřízne povrch tak, aby bylo pojivo zarovnáno s kroužkem. Kroužek s pojivem se vloží do držáku a na kroužky se nasadí centrovací prstence zajišťující působení zatěžovacích kuliček právě ve středu kroužku. Takto sestavená aparatura se vloží do kádinky s převařenou destilovanou vodou o teplotě $(5 \pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$ a celá se temperuje 15 minut na teplotu $(5 \pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$. Na dně kádinky se také nachází magnetické míchadlo. Pomocí chemických kleští se do každého centrovacího prstence umístí ocelová kulička. Kapalina v lázni se míchá a zespod zahřívá tak, aby teplota stoupala rovnoměrně rychlostí $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$. U každého kroužku a kuličky se zaznamenává teplota udávaná teploměrem v okamžiku, kdy asfalt obklopující kuličku protne při použití automatického zařízení paprsek světla umístěný 25 mm pod spodní hranou kroužku [9].

4 POUŽITÉ MATERIÁLY

Asfaltové pojivo bylo extrahováno ze směsi typu ACO 11 S (asfaltový beton pro obrusné vrstvy) obsahujících R-materiál, a to v množství 0 %, 15 %, 30 % a 50 %. Jako přidávané pojivo bylo použito PMB 45/80-65 (polymerem modifikované asfaltové pojivo). Celkový obsah pojiva srovnávaných asfaltových směsí byl $(5,5 \pm 0,5)\%$. Mezerovitost asfaltových směsí byla $(3,0 \pm 0,5)\%$. Všechny tyto asfaltové směsi byly vyrobeny na obalovně s využitím technologie paralelního bubnu. Při tomto postupu dochází k předeřhnutí R-materiálu v paralelním bubnu a po jeho vysušení je R-materiál dávkován spolu s čistým kamenivem a novým asfaltovým pojivem do míchacího zařízení obalovny, kde dochází k jejich promísení. Je nutno podotknout, že do asfaltových směsí nebyla pro účely tohoto výzkumu záměrně dávkována oživovací přísada.

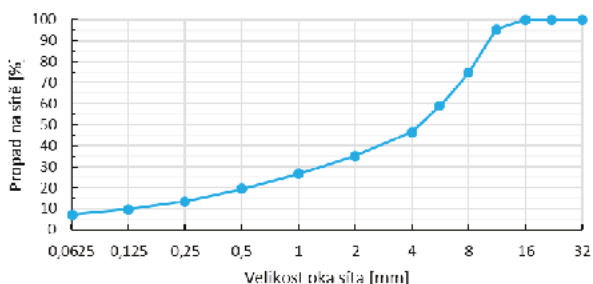
Kamenivo o frakcích 0/2 mm, 2/5 mm, 4/8 mm a 8/11 mm obsažené v těchto asfaltových směsích pochází z lomu Sýkořice. Jemná vápencová moučka pochází z lokality Velké Hydčice.

Na extrahovaném kamenivu byl proveden síťový rozbor (viz Tab. 1) a rovněž pak byla stanovena čára zrnitosti kameniva asfaltové směsi (viz Obr. 2).

Tab 1 Síťový rozbor.

Síto [mm]	Propad [%]
32	100,0
22	100,0
16	100,0
11	95,4
8	74,7
5	58,9
4	46,4
2	35,1
1	26,5
0,5	19,4
0,25	13,4
0,125	9,6
0,063	7,2

Čára zrnitosti asfaltové směsi



Obr. 2 Čára zrnitosti.

5 VÝSLEDKY

Z asfaltových směsí odebraných na obalovně bylo ve třech krocích extrahováno asfaltové pojivo. Doba macerace vzorku asfaltové směsi v rozpouštědle (tetrachlorethylen), byla prováděna s cílem získat přibližně 1/3 asfaltového pojiva z každé jednotlivé extrakce. Na základě optimalizace této metody prováděné na asfaltové směsi obsahující 15 % R-materiálu, byly délky macerace stanoveny následovně: 1 minuta pro 1. stupeň postupné extrakce, 2 minuty pro 2. stupeň postupné extrakce a 45 minut pro závěrečný 3. stupeň postupné extrakce. Ukázalo se však, že s rostoucím podílem R-materiálu obsaženého v asfaltové směsi, dochází ke snížení množství asfaltového pojiva získaného z 2. extrakce, a naopak zvýšení množství asfaltového pojiva získaného z 3. extrakce. Množství asfaltového pojiva získaného z 1. extrakce bylo neměnné. Zmíněný jev byl zřetelný především u asfaltových směsí obsahujících 30 % a 50 % R-materiálu. Tento poznatek tedy může sloužit jako jeden z možných způsobů k detekování relativní přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi. Je však nutno počítat s tím, že intenzita tohoto jevu bude pravděpodobně pro různé typy asfaltových směsí odlišná.

Všechna extrahovaná pojiva byla dále podrobena empirickým zkouškám asfaltových pojiv a jejich výsledky jsou prezentovány dále v textu.

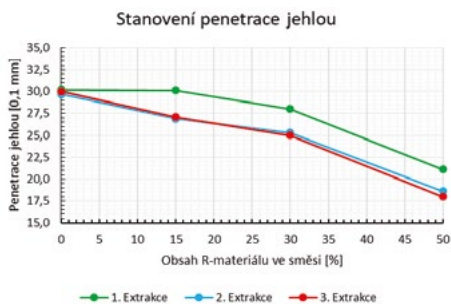
Penetrace jehlou

Penetrace jehlou jednotlivých asfaltových pojiv, získaných postupnou extrakcí, byla stanovena na základě tří vpichů penetrační jehly do vzorku asfaltového pojiva. Následně se z těchto tří naměřených hodnot stanovily průměry, které jsou uvedené v Tab. 2.

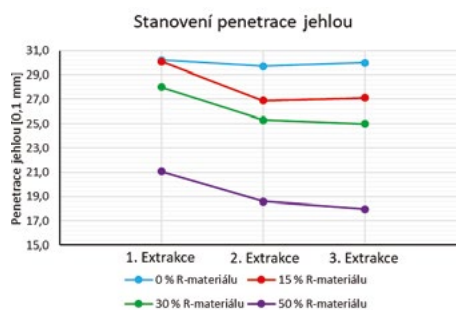
Tab. 2 Průměrné hodnoty penetrace jehlou

Penetrace jehlou [0,1 mm]	Množství R-materiálu ve směsi			
	0 %	15 %	30 %	50 %
1. extrakce	30,2	30,1	28,0	21,1
2. extrakce	29,7	26,9	25,3	18,6
3. extrakce	30,0	27,1	25,0	18,0

Z Obr. 3 a Obr. 4 je jasné vidět, že s rostoucím podílem R-materiálu obsaženého v asfaltové směsi klesá penetrace asfaltového pojiva – pojivo je tedy tvrdší. To je zapříčiněno tím, že R-materiál obsahuje zestárlé asfaltové pojivo. Ke stárnutí asfaltového pojiva dochází během výroby asfaltové směsi, kdy je pojivo vystaveno vysokým teplotám potřebným ke správnému míchání asfaltové směsi a také v průběhu životnosti vrstvy asfaltové směsi. Tomuto degradačnímu procesu se nedá zabránit, pouze je možné omezit jeho projevy, například využitím oživovací přísady.



Obr. 3 Závislost penetrace jehlou na množství R-materiálu obsaženém v asfaltové směsi.



Obr. 4 Závislost penetrace jehlou na fázi postupné extrakce.

Na Obr. 4 je jasně vidět, že penetrace asfaltových pojiv s obsahem 0 % R-materiálu je ve všech třech fázích postupné extrakce téměř neměnná. To znamená, že v asfaltové směsi se opravdu nevyskytuje R-materiál a zrna kameniva jsou obalena pouze novým asfaltovým pojivem. Naopak u asfaltových pojiv extrahovaných ze směsi obsahujících R-materiál je zřetelný pokles penetrace mezi 1. a 2. extrakcí. To je zapříčiněno tím, že v průběhu 1. extrakce dochází k rozpouštění převážně nezestárlého asfaltového pojiva, obalujícího nově přidaná zrna kameniva. Během 2. extrakce se pak rozpouští také zestárlé asfaltové pojivo, obalující zrna R-materiálu (zestárlé asfaltové pojivo je tvrdší a rozpouští se tedy pomaleji). Při poslední 3. extrakci dochází k rozpouštění zbytku asfaltového pojiva. Na povrchu zrn R-materiálu mohou zůstat "přípečené" nerozpustné zbytky asfaltového pojiva (tzv. black rock), které slouží jako spolehlivá a jednoduchá detekce přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi.

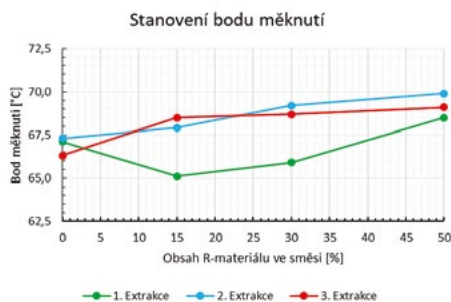
Z Obr. 4 je vidět, že penetrace mezi 2. a 3. extrakcí se již výrazně nemění. To znamená, že asfaltové směsi byly při výrobě dostatečně promíchány.

Bod měknutí

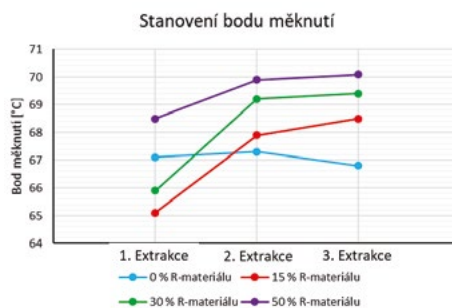
Druhou prováděnou empirickou zkouškou extrahovaných asfaltových pojiv byl bod měknutí. Bod měknutí byl stanoven vždy na základě čtyř prováděných měření, ze kterých byly následně stanoveny průměry uvedené v Tab 3.

Tab 3 - Průměrné hodnoty bodu měknutí

Bod měknutí [°C]	Množství R-materiálu ve směsi			
	0 %	15 %	30 %	50 %
1. extrakce	67,1	65,1	65,9	68,5
2. extrakce	67,3	67,9	69,2	69,9
3. extrakce	66,3	68,5	68,7	69,1



Obr. 5 Závislost bodu měknutí na množství R-materiálu obsaženém v asfaltové směsi.



Obr. 6 Závislost bodu měknutí na fázi postupné extrakce.

Z Obr. 5 a Obr. 6 je zřetelné, že se zvyšujícím se podílem R-materiálu, obsaženého v asfaltové směsi, se zvyšuje tvrdost asfaltového pojiva – teplota bodu měknutí má rostoucí tendenci.

Na rozdíl od penetrace jehlou, kde na Obr. 3 jsou křivky 2. a 3. extrakce téměř totožné, dochází na Obr. 5 ke zvětšení rozdílů mezi 2. a 3. extrakcí. To je zapříčiněno pravděpodobně tím, že zkouška bodu měknutí má menší přesnost než zkouška penetrace jehlou.

Na Obr. 6 je zřetelný rozdíl ve tvaru křivek pro asfaltová pojiva vyextrahovaná ze směsí obsahujících R-materiál od směsí bez R-materiálu. Mezi asfaltovým pojivem z 1. a 2. extrakce dochází ke značnému nárůstu teploty bodu měknutí – tedy k nárůstu tvrdosti asfaltového pojiva. Tato metoda může (stejně jako penetrace jehlou) sloužit k detekci R-materiálu v asfaltové směsi. Je však zapotřebí zohlednit, že každá asfaltová směs se může chovat jinak. Křivka zobrazující výsledky zkoušek pojiva z jednotlivých extrakcí běžného silničního asfaltového pojiva nemusí být totožná s křivkou polymerem či pryží modifikovaného asfaltového pojiva.

Z Obr. 6 je v neposlední řadě patrné, že rozdíl bodu měknutí mezi 2. a 3. extrakcí je pro všechna pojiva téměř zanedbatelný. To znamená, že asfaltové směsi byly při výrobě dostatečně promíchány.

6 ZÁVĚR

Z výsledků prováděných empirických zkoušek asfaltových pojiv lze usuzovat, že metody postupné extrakce jsou vhodné pro detekci přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi. Aspektů, potvrzujících přítomnost R-materiálu v asfaltové směsi, je hned několik. Prvním, pouze orientačním znakem, odhalujícím možnou přítomnost R-materiálu, je měnění se poměr množství vyextrahovaného asfaltového pojiva během 2. a 3. extrakce. Druhým charakteristickým rysem, potvrzujícím přítomnost R-materiálu ve směsi, je výskyt tzv. black rock na zrnech omytých rozpouštědlem. S jistotou lze však určit přítomnost R-materiálu až z výsledků zkoušek asfaltových pojiv. U asfaltových pojiv obsahujících zestárlé pojivo pocházející z R-materiálu dochází k výrazné změně penetrace, nebo bodu měknutí především mezi 1. a 2. extrakcí. Rozdíl mezi 2. a 3. extrakcí nám pak říká, jak kvalitně byla asfaltová směs promíšena s R-materiálem.

Použité zkušební metody sice spolehlivě detekují přítomnost R-materiálu v asfaltové směsi, jejich citlivost pro přesné určení kvality promíchání směsi je však nedostačující. Pro přesné určení rozdílů mezi novým a zestárlým asfaltovým pojivem se jeví jako vhodné využití moderních zařízení jako jsou dynamický smykový reometr, nebo FTIR spektrometr s jehož pomocí se stanoví karbonylový index ICO. Pokud jsou hodnoty ICO neměnné, byla směs dostatečně promíchána.

Poděkování

Príspevek vznikl s podporou projektu FAST-J-20-6311 „Postupná extrakce pojiva z asfaltových směsí obsahujících R-materiál“ podporovaného Vysokým učením technickým v Brně.

Použité zdroje

- [1] Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu. Ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/kjotsky_protokol
- [2] Pařížská dohoda. Ministerstvo životního prostředí [online]. [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/parizska_dohoda/\\$FILE/OEOK-Cesky_preklad_dohody-20160419.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/parizska_dohoda/$FILE/OEOK-Cesky_preklad_dohody-20160419.pdf)
- [3] NOWAK, Tomáš. HODNOCENÍ STAVU POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ V ČR. Brno, 2012. Ba.
- [4] ČSN 73 6121. Stavba vozovek - Hutnění asfaltových vrstev - Provádění a kontrola shody. Praha: ČNI, 2008.
- [5] ZIMA, Dominik. Problematika R-materiálu v asfaltových směsích. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
- [6] ZHAO, Sheng, Baoshan HUANG a Xiang SHU. Investigation on binder homogeneity of RAP/RAS mixtures through staged extraction. Construction and Building Materials. 2015, 1(82), 184-191. ISSN 0950-0618.
- [7] ČSN EN 12697-3. Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení. Praha: ČNI, 2006.
- [8] ČSN EN 1426. Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou. Praha: ČNI, 2007.
- [9] ČSN EN 1427. Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička. Praha: ČNI, 2007

ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOTI DOPRAVNÍ POPTÁVKY VE ZVOLENÝ DEN A ČAS

PROBABILITY DISTRIBUTION OF TRAFFIC DEMAND ON CHOSEN WEEKDAY AND TIME OF DAY

Igor Mikolášek^{*,1}

*igor.mikolasek@vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Při dopravních průzkumech jsou relativně rutinně odhadovány poptávkové profily zobrazující čekávaný průběh poptávky v pracovní den či o víkendu. Skutečná poptávka však náhodně osciluje okolo odhadnuté hodnoty, což může vést mimo jiné k překročení kapacity a následně v důsledku poklesu kapacity ke tvorbě kongescí. Variabilita poptávky dosud nebyla z tohoto pohledu prakticky vůbec studována, může však hrát roli v dopravních modelech a dopravně-inženýrských úlohách. Výsledky neukazují jednoznačně jedno rozdělení. Celkově nejlhodněji se jeví rozdělení log-normální, což je podpořeno teoretickými předpoklady, avšak v některých dnech a časech vychází lépe normální nebo gamma rozdělení. Vliv bude patrně mít pravidelnost a míra poptávky v daný čas (např. pravidelná ranní špička).

Klíčová slova

Dopravní poptávka, náhodná veličina, rozdělení pravděpodobnosti, dopravní model, shoda modelu s daty

Abstract

Traffic surveys quite routinely estimate profiles of traffic demand showing the expected evolution of demand over a workday od weekend. However, the actual demand oscillates around this value which can lead to exceeding of the capacity and consequent queueing due to the capacity drop. The demand variability has not yet been properly studied from this point of view, despite the fact it can play a role in modelling and traffic engineering applications. The results do not clearly show a single random distribution. Log-normal distribution seems to fit the best overall, supported by theoretical expectations, however, normal and gamma distributions show better fit on many occasions. The regularity and magnitude of demand (e.g. morning peak hour) probably play a role in this.

Key words

Traffic demand, random variable, probability distribution, traffic model, goodness-of-fit

1 ÚVOD

Článek se zabývá otázkou rozptylu skutečné poptávky okolo očekávané hodnoty pro daný den a čas, dané poptávkovým profilem. Výstupem dopravního průzkumu může být poměrně běžně průměrný poptávkový profil pro pracovní či víkendový den. Tento představuje průměr za naměřená data v průběhu měření (často navíc extrapolovaná a dopočítaná přes přepočtové koeficienty dle TP 189 [1]), neříká však nic o možném rozptylu těchto hodnot. Přitom tento může hrát zejména ve chvílích, kdy je to důležité, významnou roli. Krátkodobý výkyv poptávky může vést k překročení kapacity a v důsledku jejímu poklesu (tzv. capacity drop) i až pod úroveň průměrné poptávky a následnému vzniku a růstu kongesce.

Tato problematika, kterou by šlo shrnout pod hlavičku "stochastický profil poptávky" není zatím v dostupné literatuře v zásadě řešena, navzdory tomu, že zohlednění možného rozptylu poptávkového profilu v čase by mohlo vést ke zkvalitnění různých predikčních modelů či optimalizaci řídicích algoritmů a lepším dopravně-inženýrským posouzením např. při návrhu řízení dopravní uzavírky světelnou signalizací s pevným cyklem signálního plánu.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Většina výzkumu souvisejícího s predikcí poptávky je zaměřena na tzv. OD matice (origin-destination matrix), které modelují přepravní vztahy mezi uzlovými body dopravní sítě, případně mezi celými uličními bloky a čtvrtěmi. Tyto se pak využívají v (převážně) čtyřstupňových makroskopických síťových modelech [2]. Historicky se pracovalo primárně s deterministickými OD maticemi, které maximálně reflektovaly rozdíly mezi ranní a odpolední špičkou. Existuje však i řada modelů zejména z posledních dvou desetiletí, které využívají rozvoje big data a výpočetních technologií [3]. Již dříve se však výzkumníci zabývali otázkou nahodilosti poptávky v ranní špičce v souvislosti s jejím rozvolňováním. Jak však uvádí Alfa [4], praktici dávali přednost jednodušším deterministickým modelům, které byly z jejich pohledu pro tehdejší aplikace dostačující.

Otázka profilové poptávky se však ve vědecké literatuře prakticky jeví jako prakticky neexistující. Ačkoliv si jsou výzkumníci i praktici nepochybně vědomi náhodných variací v poptávkovém profilu, které se projevují jak ve smyslu mezi-denních a mezi-týdenních variací, tak krátkodobými výkyvy, v praxi jim není věnována významná pozornost. Pokud je taková variabilita v modelu zohledněna, bývá to zpravidla formou variačního koeficientu s normálním rozdělením, viz např. Brillon et al. [5], kteří použili variační koeficient rozdělením $N\sim(1; 0,1)$.

Žádnou studii, která by se zabývala náhodným rozdělením stochastického profilu poptávky z podobného pohledu jako tato se nepodařilo dohledat.

3 METODIKA

Jako vstupní data byla použita data z detektorů ASIM umístěných v km 32,9 na dálnici D5 ve směru na Prahu za červen až prosinec 2015 (celkem 29 týdnů). Původní data jsou agregována po pěti minutách a intenzity jsou rozděleny do šesti kategorií dle typu vozidla.

V prvním kroku byly intenzity agregovány, přičemž nákladní vozidla byla započítána dvakrát, aby byl zohledněn jejich větší dopad na dopravní proud (intenzita byla tedy v ekvivalentech osobních vozidel). Měření byla rozřazena do intervalů označených ID ve tvaru DenTýdne_Hodina_Pětiminutovka odpovídající týdennímu profilu rozdělení na pětiminutové úseky, celkem tedy 2016 skupin ($7 \times 24 \times 12$), každá s až 29 měřeními. Následně byl na každou skupinu aplikován filtr odlehlých měření, kdy byla vyřazena měření s absolutní hodnotou Z-skóre více než 3.

Na každou skupinu bylo následně pomocí algoritmu vytvořeného v jazyce R "nafitováno" pět zvolených náhodných rozdělení: normální (norm), gamma, Weibullovo (Weib), inverzní Weibullovo (invWeib) a log-normální (lnorm). Tato byla zvolena na základě teoretických předpokladů a typických histogramů poptávky z náhodně zvolených skupin.

Výsledkem byly vždy hodnoty parametrů jednotlivých rozdělení (např. střední hodnota a rozptyl normálního rozdělení) a Akaikeho informační kritérium (AIC), které popisuje míru shody modelu s daty. Protože všechny modely (rozdělení) mají dva parametry, šlo by stejně dobře využít i logaritmus věrohodnosti (log-likelihood), avšak u něj je díky záporným hodnotám méně přímočará interpretace.

Výběr vhodného rozdělení probíhal v několika fázích, neboť se ukázalo, že výsledky nejsou zdaleka jednoznačné. V první fázi byl pro každou skupinu určen model rozdělení s nejlepší shodou a vyhodnocení proběhlo na základě počtu nejlepších shod daného rozdělení. Protože výsledky byly velmi mnohoznačné, byla každá skupina doplněna o data o intenzitách ze sousedních skupin. U těchto lze očekávat přibližně shodnou průměrnou intenzitu, tedy zanedbatelné zkreslení, avšak je dosaženo trojnásobného počtu vzorků dat pro každou skupinu, což umožňuje přesnější odhad rozdělení. Všechny prezentované výsledky vychází z takto upravených dat.

Výpočet byl zopakován s upravenými daty, avšak výsledky, jakkoliv věrohodnější, stále nebyly jednoznačné. Dále tedy byly z hodnocení odstraněny skupiny odpovídající víkendů a nočním hodinám, které hrají v modelech a dopravně-inženýrských aplikacích malou roli a zároveň lze očekávat fundamentálně jiné charakteristiky.

Nakonec byly počty shod vyhodnoceny po jednotlivých dnech, a i po jednotlivých hodinách, a pro stejné podmnožiny skupin měření bylo vyhodnoceno také průměrné AIC. To umožňuje porovnat míru, do jaké je nejvhodnější rozdělení vhodnější než ta ostatní, kdy malý rozdíl v AIC nemusí znamenat velkou ztrátu přesnosti.

4 VÝSLEDKY

Tab. 1 zobrazuje první agregované výsledky po rozšíření skupin o sousední intervaly měření, a to jak při zohlednění všech 2016 skupin měření, tak jen pro pracovní dny v 6-18 hod.

Tab. 1 Souhrn počtu nejlepších shod jednotlivých rozdělení při zohlednění všech intervalů a po odstranění víkendů a nočních hodin.

Rozdělení	norm	gamma	Weib	invWeib	lnorm
počet nej. Shod (Po-Ne)	475	615	215	60	651
počet nej. Shod (Po-Pá 6-18 hod)	221	150	63	33	253

Následující tabulky Tab. 2 až Tab. 6 prezentují výsledky ostatních analýz. V levé polovině je vždy uveden počet nejlepších shod daného rozdělení v rámci dané podmnožiny skupin měření, v pravé polovině pak průměrná hodnota AIC. Ve výsledcích jsou barevnou škálou zvýrazněny lepší a horší výsledky (v levé polovině pro celou tabulku, v pravé vždy pro každý řádek zvlášť). V horním řádku jsou výsledky agregovány pro celý pracovní den mezi 6-18 hod, další řádky odpovídají jednotlivým hodinám.

Obr. 1 potom ilustruje rozdíly mezi třemi vybranými rozděleními na jedné skupině měření odpovídající pondělí 15:20 až 15:25, tedy přibližně začátku odpolední špičky. Zvolená log-normální (dobré), normální (ucházející) a Weibullovo (nevhodné) rozdělení ilustrují cíleně různou míru shody popsanou pod obrázkem hodnotou AIC.

Tab. 2 Počty nejlepších shod jednotlivých rozdělení pro pondělí v časech 6–18 hod. V levé části je uveden počet, kolikrát bylo dané rozdělení nevhodnější, v pravé pak průměrná hodnota AIC. V obou částech tabulky jsou barevně odlišeny dobré (zeleně) a špatné (bíle/červeně) hodnoty.

pondělí	norm	gamma	Weib	invWeib	lnorm	norm	gamma	Weib	invWeib	lnorm
celkem	44	31	20	7	42	719,60	721,45	726,61	751,44	724,34
6-7	3	0	9	0	0	740,81	757,11	737,89	825,59	768,93
7-8	5	0	7	0	0	773,28	791,70	771,53	865,11	805,19
8-9	9	0	3	0	0	748,45	757,38	751,50	815,24	765,09
9-10	7	3	1	0	1	699,82	701,47	705,07	734,60	703,85
10-11	2	8	0	0	2	727,38	726,05	734,89	748,09	726,92
11-12	2	4	0	0	6	707,81	705,61	717,13	723,74	705,74
12-13	9	3	0	0	0	683,93	684,58	689,25	711,56	686,15
13-14	2	5	0	0	5	688,50	686,11	698,76	700,38	686,00
14-15	0	2	0	2	8	693,79	689,75	705,84	693,27	688,56
15-16	0	1	0	3	8	721,37	715,86	734,69	718,83	714,15
16-17	4	3	0	0	5	720,51	718,44	730,05	739,04	718,90
17-18	1	2	0	2	7	729,55	723,37	742,64	741,86	722,62

Tab. 3 Počty nejlepších shod jednotlivých rozdělení pro pondělí v časech 6–18 hod.

úterý	norm	gamma	Weib	invWeib	lnorm	norm	gamma	Weib	invWeib	lnorm
celkem	41	21	1	14	67	744,71	742,48	753,32	762,15	743,20
6-7	10	2	0	0	0	749,33	752,29	752,30	792,58	756,48
7-8	9	2	1	0	0	765,42	770,41	769,68	819,42	775,91
8-9	10	2	0	0	0	775,36	778,07	780,29	820,87	782,57
9-10	7	2	0	0	3	754,09	754,95	760,26	792,84	758,19
10-11	3	4	0	0	5	732,26	730,23	739,10	753,25	731,09
11-12	0	1	0	3	8	736,49	730,32	748,13	736,09	728,66
12-13	1	1	0	0	10	737,04	732,28	748,25	742,70	731,26
13-14	1	0	0	1	10	724,38	720,02	736,90	730,29	719,04
14-15	0	1	0	0	11	765,15	759,22	775,85	763,83	757,60
15-16	0	0	0	5	7	756,32	749,19	769,30	748,55	746,81
16-17	0	4	0	5	3	719,37	714,83	729,31	717,35	713,48
17-18	0	2	0	0	10	721,36	717,90	730,51	728,07	717,28

Tab. 4 Počty nejlepších shod jednotlivých rozdělení pro pondělí v časech 6–18 hod.

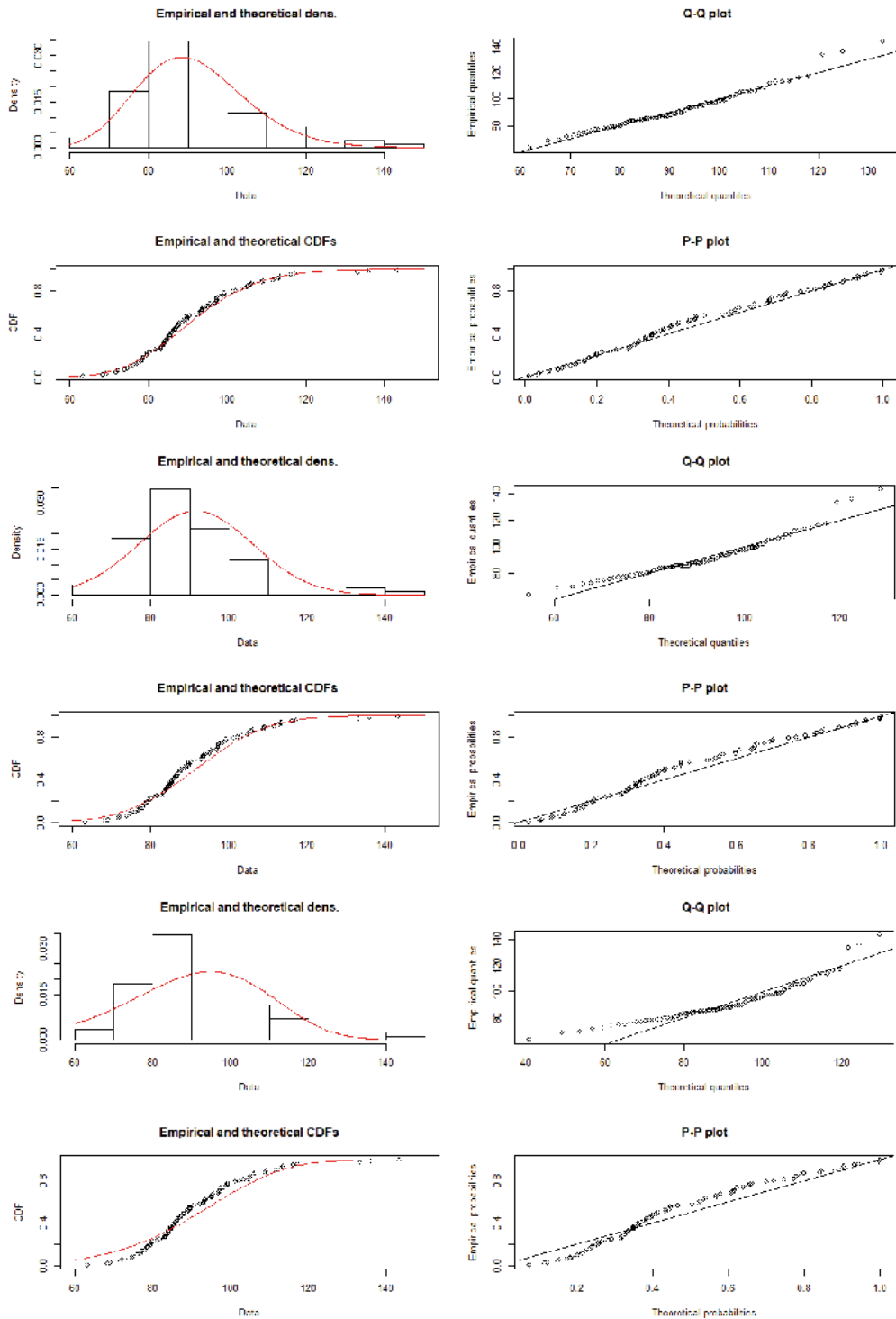
středa	norm	gamma	Weib	invWeib	lnorm	norm	gamma	Weib	invWeib	lnorm
celkem	52	31	7	1	53	730,69	731,07	737,47	757,84	733,21
6-7	9	3	0	0	0	742,48	745,36	745,28	784,92	749,69
7-8	8	0	4	0	0	805,89	811,91	806,48	855,89	818,03
8-9	10	1	1	0	0	790,46	802,47	793,31	873,02	814,16
9-10	4	4	0	0	4	737,96	736,66	746,07	761,61	737,89
10-11	0	4	0	1	7	728,70	725,25	738,47	737,43	724,67
11-12	3	2	1	0	6	724,60	722,98	732,82	742,58	723,31
12-13	4	2	0	0	6	735,87	734,47	744,15	757,02	735,36
13-14	4	4	0	0	4	736,64	735,37	745,00	760,13	736,21
14-15	7	2	0	0	3	707,79	707,94	714,03	735,26	709,45
15-16	0	4	1	0	7	701,25	698,91	708,90	714,82	699,04
16-17	1	3	0	0	8	678,32	675,55	688,33	685,12	675,08
17-18	2	2	0	0	8	678,38	675,91	686,82	686,28	675,60

Tab. 5 Počty nejlepších shod jednotlivých rozdělení pro pondělí v časech 6–18 hod.

čtvrtek	norm	gamma	Weib	invWeib	lnorm	norm	gamma	Weib	invWeib	lnorm
celkem	62	22	32	4	24	722,44	727,49	727,18	770,19	732,70
6-7	7	0	4	0	1	708,10	721,98	708,81	793,07	733,25
7-8	8	0	4	0	0	761,52	778,82	762,31	857,83	792,92
8-9	9	0	3	0	0	779,23	791,27	780,41	852,74	802,06
9-10	8	1	3	0	0	719,05	723,98	721,29	768,27	728,67
10-11	9	1	1	0	1	719,74	722,81	722,44	759,43	726,09
11-12	3	4	1	0	4	687,39	686,11	696,99	708,47	686,60
12-13	2	1	1	1	7	687,67	685,47	698,71	702,90	685,57
13-14	4	1	1	2	4	707,17	706,28	715,49	731,30	707,46
14-15	3	5	1	0	3	720,22	718,89	728,24	745,26	719,77
15-16	3	1	3	1	4	722,99	724,74	729,86	755,82	727,47
16-17	2	8	2	0	0	739,98	740,34	746,11	777,76	743,37
17-18	4	0	8	0	0	716,27	729,15	715,46	789,39	739,13

Tab. 6 Počty nejlepších shod jednotlivých rozdělení pro pondělí v časech 6–18 hod.

pátek	norm	gamma	Weib	invWeib	lnorm	norm	gamma	Weib	invWeib	lnorm
celkem	22	45	3	7	67	698,42	695,84	706,51	713,31	696,02
6-7	0	3	0	1	8	660,36	656,43	669,03	662,54	655,48
7-8	0	2	0	2	8	698,30	693,08	708,46	701,10	691,82
8-9	0	2	0	0	10	688,56	684,59	698,44	695,04	683,83
9-10	0	1	0	1	10	667,42	663,51	677,42	671,89	662,60
10-11	2	2	1	3	4	674,39	671,92	682,53	685,48	671,90
11-12	4	4	2	0	2	674,73	674,96	679,80	697,84	676,29
12-13	0	5	0	0	7	684,42	681,80	692,80	696,52	681,67
13-14	3	7	0	0	2	718,79	717,54	727,35	746,73	718,72
14-15	2	7	0	0	3	731,76	730,12	739,45	756,21	731,31
15-16	3	4	0	0	5	737,00	734,17	745,81	759,40	734,70
16-17	3	5	0	0	4	749,14	747,19	755,48	772,37	748,33
17-18	5	3	0	0	4	696,20	694,78	701,51	714,58	695,60



Obr. 1 Ilustrativní srovnání hustoty/rozdělení pravděpodobnosti a Q-Q/P-P plotu log-normálního (nahore, AIC 706,8) a normálního (uprostřed, AIC 717,3) a Weibullova (dole, AIC 735,2) rozdělení. Odhady jsou pro ponděží 15:20-15:35.

5 DISKUZE

Z výsledků prezentovaných v tabulkách plyne, že variabilita profilových intenzit se patrně neřídí jedním rozdělením, ale závisí na řadě faktorů. To by s ohledem na centrální limitní větu podporovalo myšlenku normálního rozdělení, které ostatně vykazuje nejlepší shodu v ranní špičce, avšak ve zbytku dne zaostává za log-normálním a gamma rozdělením. Navíc proti němu svědčí fakt, že hrozí riziko generování záporných intenzit, neboť není zdola omezeno. V tomto ohledu je teoreticky podloženo log-normální rozdělení, které má v průměru nejvíce nejlepších shod a hraje prim zejména v odpoledních hodinách. Gamma rozdělení je také zdola omezeno nulou a zpravidla díky své flexibilitě nikde významně nezaostává, relativně méně je však nevhodnější. Weibullovo i inverzní Weibullovo rozdělení se navzdory předpokladům ukázaly spíše nevhodné. Neočekávanou časovou závislost lze částečně vysvětlovat rozdílnou charakteristikou poptávky (míra (ne)pravidelnosti poptávky) v ranní špičce a v pátek, které vykazují nevýraznější systematické tendence a částečně teoreticky omezením daným kapacitou, avšak ta by za běžného provozu neměla být ve studovaném úseku omezující. Nepodařilo se však ověřit, zda v průběhu části měření neprobíhalo v lokalitě částečné omezení provozu.

Obr. 1 ukazuje, jak dobré či špatné jsou shody modelů s daty při různém AIC. Hodnotu AIC je však možné srovnávat pouze u modelů se shodnými daty (v rámci jedné skupiny (ID) měření), nikoliv napříč skupinami měření. Pro některé skupiny je dobrá hodnota před 800, pro jiné pod 700, závisí na počtu měření a rozptylu dat. Shodu zobrazeného log-normálního rozdělení lze od pohledu považovat za velmi dobrou, i normální lze bez srovnání považovat za dobré. U Weibullova je však na první pohled zjevný rozpor mezi histogramem a hustotou pravděpodobnosti, což potvrzují i grafy distribuční funkce a Q-Q a P-P grafy srovnávající teoretické a empirické kvantily a pravděpodobnosti.

6 ZÁVĚR

Závěrem lze říct, že žádné z testovaných rozdělení se neukázalo jako jednoznačně nejvhodnější. Celkově lze jako "vítěze" a asi nejvhodnějšího kandidáta pro praktické využití označit log-normální s ohledem na teoretickou vhodnost, nejvyšší počet nejlepších shod a poměrně dobré výsledky i v ostatních skupinách. Praktické zkušenosti však ukazují také na potřebu eliminace odlehklých hodnot, které následně mohou díky logaritmické transformaci výrazně ovlivňovat odhad rozptylu a následně vést k častému generování extrémních intenzit. Normální rozdělení, které má výhodu ve snadné aplikovatelnosti, dopadlo také poměrně slušně, jen je potřeba dávat pozor na záporné hodnoty intenzit. Gamma rozdělení pak představuje poměrně univerzální střední cestu, kdy je méně často nejlepší, ale jen výjimečně výrazně zaostává.

Poděkování

Studie byla zpracována za finanční podpory VUT ze Specifického juniorského výzkumu FAST-J-20-6145.

Použitá zdroje

- [1] Technické podmínky TP 189 - Stanovení intenzit dopravy na PK. 3. vydání. Praha: Ministerstvo dopravy. 2018
- [2] G., McNally Michael. The Four-Step Model. In: David A HENSHER a Kenneth J BUTTON, ed. Handbook of Transport Modelling [online]. B.m.: Emerald Group Publishing Limited, 2007, s. 35–53. ISBN 978-0-08-045376-7, 978-0-857-24567-0/. Dostupné z: doi:10.1108/9780857245670-003
- [3] ZHAO, Yongmei, Hongmei ZHANG, Li AN a Quan LIU. Improving the approaches of traffic demand forecasting in the big data era. Cities [online]. 2018, 82, 19–26. ISSN 0264-2751. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.04.015
- [4] ALFA, Attahiru Sule. A review of models for the temporal distribution of peak traffic demand. Transportation Research Part B: Methodological [online]. 1986, 20(6), 491–499. ISSN 0191-2615. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/0191-2615(86)90027-5
- [5] BRILON, Werner, Justin GEISTEFELDT a Hendrik ZURLINDEN. Implementing the concept of reliability for highway capacity analysis. Transportation Research Record [online]. 2007, (2027), 1–8. ISSN 03611981. Dostupné z: doi:10.3141/2027-01

AKUSTICKÁ ANALÝZA PRŮJEZDU TRAMVAJÍ PŘES KOLEJOVOU KONSTRUKCI ODBOČENÍ SE SRDCOVKOU S MĚLKÝM ŽLÁBKEM

ACOUSTIC ANALYSIS OF TRAM PASSAGE OVER A SWITCH WITH SHALLOW CROSSING

Ondřej Bret ^{*,1}

* ondrej.bret@fsv.cvut.cz, ondrej.bret@gmail.com

¹ Fakulta stavební, ČVUT v Praze, Katedra železničních staveb. Thákurova 2077 / 7, Praha 6 - Dejvice, 166 29

Abstrakt

Príspevok popisuje pilotní experiment zaměřený na zjištění zdrojů hluku při průjezdu přes sledovanou kolejovou konstrukci tramvajové tratě. Měření bylo provedeno u sledované kolejové konstrukce rychlostní výhybky R04 s mělkou srdcovkou na odbočení tramvajové trati v Praze-Braníku, umístěné na trati Výtoň - Sídliště Modřany u odbočení do obratiště Nádraží Braník. Cílem experimentu bylo ověření hypotézy, že k celkovému hluku emitovanému do okolí ve sledovaném úseku je významným přispěvovatelem jak přejezd kol přes rozjezdový hrot srdcovky, tak i průjezd kol přes svar náběžné kolejnice před srdcovkou. Experiment proběhl s využitím tzv. akustické kamery.

Klíčová slova

Tramvajové tratě, kolejové konstrukce, srdcovka, hluková zátěž, akustická kamera

Abstract

The paper describes experiment aimed at determining the sources of noise passing through the monitored track structure of the tram line. The measurement was performed at the monitored track structure (denomination "R04") at the turn of the tram line in Prague-Branik, located on the Vyton - Modrany district line at the turn to the Branik railways station. The aim of the experiment was to verify the hypothesis that the noise load of wheels through the weld in front of the shallow crossing is comparatively problematic to noise emitted from crossing. The experiment was performed using acoustic camera.

Key words

Tramway track, turnout, crossing, noise pollution, acoustic camera

1 ÚVOD

V rámci dlouhodobého sledování kolejových konstrukcí u tramvajových tratí, jejich deformace, ojetí a optimalizace průjezdu vozidel je jedním z klíčových hledisek také hluková zátěž emitovaná při průjezdu tramvají do okolí. Hluk emitovaný provozem je nepříjemným a nežádoucím doprovodným jevem (nejen tramvajového provozu, ale také často omezující překážkou jak pro stávající provoz (například v noční době), tak i pro rozvoj a výstavbu nových tramvajových tratí. V této souvislosti je třeba brát zřetel nejen na mezikřížovatkové úseky tratí, které jsou sice s ohledem na podíl jejich délky výrazně převažující (a u nichž lze kombinací aktivních a pasivních protihlukových opatření dosáhnout velmi příznivých účinků vedoucích k významnému ztišení tratě), ale také na kolejové konstrukce. Kolejové konstrukce mohou být v důsledku významně problematičtějším zdrojem hluku, než "širé" tratě a projevují se zde i jiné dominantní složky vznikajícího hluku - nárazy kol na hroty srdcovek, "kastanětování podvozků" (jev popsáný např. v [1]), a další.

Jako kolejová konstrukce je obecně chápána konstrukce kolejového svršku umožňující přejezdy kolejových vozidel mezi kolejemi, úrovně křížení kolejí, nebo konstrukce plnící jinou funkci, kterou nemůže plnit kolej běžné konstrukce. Jedná se především o výhybky, výhybkové konstrukce a kolejové křížovatky, ale i o splítkové výhybky a kolejové splítky, kolejová dilatační zařízení a výkolejky [2]. Výzkum, jehož některé výstupy popisuje

tento příspěvek, se zaměřuje konkrétně na srdcovkovou část tramvajových kolejových konstrukcí, lokalizovaných v síti Dopravního podniku hlavního města Prahy.

Již zde v úvodu je nutné zdůraznit, že na průjezd kolejových vozidel (v tomto případě tramvají) má zásadní vliv i charakter a provedení vozů a jejich kol. Rozbor této problematiky přesahuje možnosti tohoto příspěvku, další informace lze však nalézt v související literatuře (např. [2], [3], nebo [4]).

V souvislosti se snahou zvýšit životnost kolejových konstrukcí u tramvajových tratí, snížit náklady na jejich údržbu, snížit hlukovou zátěž související s průjezdem tramvají přes kolejové konstrukce a snahy zavést prediktivní a plánovací systém řízení údržby byla navázána spolupráce Fakulty stavební ČVUT v Praze, Dopravního podniku hlavního města Prahy a Pražské strojírný a.s. (Projekt TAČR Dlouhodobý monitoring kolejových konstrukcí u tramvajových křižovatek). V rámci této spolupráce je řešeno více dílčích úkolů. Jednou z řešených oblastí je problematika hlukových emisí souvisejících s průjezdem tramvají přes srdcovkové části kolejových konstrukcí. Je nutné zdůraznit, že tato problematika se velmi liší nejen v porovnání se zahraničím, ale i při srovnávání jednotlivých tramvajových provozů v České republice. To je způsobeno zejména odlišným provedením kol, a to jak tvarem jízdní plochy ("nákolku"), výšky a provedení okolku, tak šířky použitého tramvajového kola. Tato nejednotnost je dána jednak historicky, kdy některé provozy vznikaly souběžně s železničními tratěmi, resp. vlečkami, na území měst a v těchto provozech byla od počátku vyžadována buď úplná nebo částečná přechodnost vozidel (například Ostrava), nebo vznikaly jako čistě "městské" provozy, kde přechodnost nebyla vynuucována, a kola tak postačovala užší a i s menším okolkem (například Praha). Tento fakt lze demonstrovat na snadno představitelném parametru šířky tramvajových kol: zatímco v síti DP Ostrava se nyní využívají kola se šířkou 120 mm, v Praze (ale i dalších provozech) se využívá kol šířky 86 mm.

Obecně lze říci, že využívání širších kol s sebou nese výhody v podobě klidnějšího a plynulejšího (tedy zpravidla i tiššího) průjezdu tramvaje přes srdcovku, přináší možnosti využívání hlubokých srdcovek i pro křížení vyšších úhlů, je však spojeno s vyššími náklady na zařízení a údržbu, nároky na bezprostřední okolí temene kolejnice (dlažební kostky, nebo jiný povrch vozovky vyčnívající nad úroveň TK) a může ovlivňovat i jízdní parametry tramvaje.

Při použití "užších" kol je možné navrhovat hluboké srdcovky jen u křížení s dostatečně ostrým úhlem, aby i užší kolo mohlo překlenout přerušenu pojižděnou plochu. Jako dostatečná šířka kontaktu kola a kolejnice/srdcovky se uvažuje cca šířka 20 mm. Z toho vyplývá limitní úhel pro využití hluboké srdcovky v pražské síti cca 18°. Pro srovnání je možné opět uvést příklad Ostravy, kde je díky větší šířce kola možné hluboké srdcovky aplikovat až do úhlu 23°.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

V tramvajové síti Dopravního podniku hlavního města Prahy se tak s ohledem na používanou šířku kol v současnosti používají ve většině srdcovky s mělkým žlábkem. Srdcovka s mělkým žlábkem má v novém stavu hloubku žlábků 14 mm a na okolní žlábkové kolejnice, které mají hloubku žlábků 39 mm, je napojena pomocí opracovaných tzv. náběžných kolejnic s náběhem dlouhým 1500 mm [2], tak, aby byl omezen vznik dynamického rázu. [5]

Srdcovky s mělkým žlábkem se používají pro kolejová křížení prakticky s jakýmkoliv úhlem křížení, protože v místě křížení je kolo převedeno po okolku a neomezuje ho tak délka přerušení pojižděné hlavy kolejnice nebo srdcovky. Nevýhodou srdcovek s mělkým žlábkem je zhoršené směrové vedení kola, které zvyšuje možné riziko vykolejení, a kvůli kterému je v důsledku omezena rychlost průjezdu. Dále dochází ke vzniku dynamických rázů při přechodu z jízdní plochy na okolek, které jsou sice omezeny náběhem žlábků, ale i tak snižují jízdní komfort, a také kvůli nim dochází k opotřebování srdcovky [5]. Dopravní a návěstní předpis pro tramvaje v Praze [6] proto omezuje u standardních výhybek rychlost jízdy proti hrotu srdcovky na nejvýše 15 km/h. V síti DP Praha se sice postupně objevují tzv. "rychlostní výhybky", které umožňují jízdu vyšší rychlostí, avšak takových výhybek je v současnosti (konec roku 2020) v síti DP Praha jen pět (z celkového počtu více než 250 výhybek). Jedná se o výhybky Prašný most (R01), Vozovna Sřešovice (R02), Letenský tunel (R03), Nádraží Braník (R04) a nově od roku 2020 i Průběžná (R05). Tyto výhybky mohou, avšak nemusí využívat hlubokého žlábků.

U všech výhybek s mělkým žlábkem, ať už standardních nebo rychlostních, dochází k dynamickému rázu při přechodu kola přes přerušenu hlavu na rozjezdový hrot srdcovky. To s sebou nese jak vyšší opotřebení částí vozidel i infrastruktury, tak vyšší emise hluku z kontaktu kola a hrotu srdcovky. V rámci řešení projektu "Dlouhodobý monitoring kolejových konstrukcí" je mimo jiné sledována právě i emitovaná akustická energie u mělkých srdcovek v závislosti na stavu jejich ojetí.

Při obhlídkách a měřeních na sledovaných lokalitách bylo subjektivně zhodnoceno, že na některých sledovaných kolejových konstrukcích emituje svar náběžné kolejnice umístěný před srdcovkou významný příspěvek k celkovému hluku z průjezdu přes kolejovou konstrukci. Jedná se o místo, kde je proveden svar náběžné kolejnice ke standardní žlábkové kolejnici. Velikost tohoto hluku byla subjektivně hodnocena obdobně, jako hluk, který emitují tramvajová kola při průjezdu přes srdcovku, resp. při kontaktu s rozjezdovým hrotem.

Tento jev byl subjektivně pozorován například na sledované výhybce R04 Braník, kde je svar náběžné kolejnice umístěn ve vzdálenosti 2,05 m od středu srdcovky. Tato vzdálenost významně ovlivňuje i sledované výsledky, neboť je téměř shodná se vzdáleností náprav v tramvajovém podvozku (1880 mm pro typ 14T a 1900 mm pro ostatní typy vozů). To způsobuje, že prakticky ve stejném okamžiku projíždí na této sledované konstrukci první náprava podvozku přes srdcovku a druhá náprava přes sledovaný svar. To ovlivňuje jak hodnocení hlukových náměrů, tak celkovou emitovanou akustickou energii při průjezdu.

Svar náběžné a navazující standardní žlábkové kolejnice je ukázán na Obr. 1 vlevo.



Obr. 1 Svar náběžné a standardní kolejnice (vlevo) a srdcovka výhybky R04 s mělkými žlábkou (vpravo).

V rámci dalšího postupu tak byla na základě těchto poznatků vyslovena hypotéza, že z pohledu hlukové zátěže okolí z provozu kolejového křížení, je svar náběžné kolejnice srovnatelně problematický s průjezdem kol přes rozjezdový hrot. Protože tento jev není možné snadno a spolehlivě dokázat měřením pomocí zvukoměrů, bylo navrženo měření pomocí tzv. akustické kamery.

3 METODIKA

Tento příspěvek popisuje prvotní experiment provedený u sledované kolejové konstrukce "Braník R04", umístěné na trati Výtoň - Sídliště Modřany u odbočení do obratiště Nádraží Braník. Jedná se o jednu ze sledovaných srdcovek, kde probíhá dlouhodobý monitoring vývoje deformace příčného profilu žlábkou a ojetí srdcovky, a také technické měření hluku. Tato srdcovka je součástí kolejové konstrukce rychlostní výhybky R04. V přímém směru je projížděna spoji ve směru Sídliště Modřany (linky 17 a 21), v odbočném směru spoji ukončenými v zastávce Nádraží Braník (linky 2 a 3). Odbočení do obratiště je umístěno zhruba uprostřed mezizastávkového úseku Pobřežní cesta - Nádraží Braník. Rychlostní výhybka umožňuje jízdu ve směru od centra v přímém směru rychlostí 30 km/h a do odbočky 15 km/h. Její vložení v roce 2017 zde odstranilo vynucený propad rychlosti projíždějících tramvají.

Akustická kamera

Dále popsán experiment byl prováděn s využitím tzv. akustické kamery. Akustická kamera je souhrnný název pro zařízení složené z mikrofonního pole (někdy též označovaného jako mikrofonní anténa), optické kamery a záznamové popřípadě i vyhodnocovací jednotky. Základním účelem je možnost zobrazení zdroje (zdrojů) hluku do zaznamenávaného obrazu (fotografie nebo videa) – a tím vytvoření tzv. „hlukové mapy“, která umožní jejich lokalizaci. Uspořádání mikrofónů v prostoru i jejich vzájemná vzdálenost mohou být různé - na základě počtu mikrofónů a jejich umístění je dán frekvenční rozsah měření akustické kamery. Uspořádání mikrofónů v prostoru může mít vliv také na přesnost vyhodnocovaného záznamu s ohledem na sledovaný zdroj. Mikrofonní

pole sestává z většího počtu mikrofonů, zpravidla v počtu vyšších desítek, nejčastěji od 36 do 120. Zaznamenávaný signál je následně na základě časového a fázového posunu záznamu z jednotlivých mikrofonů analyzován a přiřazován do plošných souřadnic snímaného obrazu.

Používá se řada různých výpočtových algoritmů vhodných pro různé účely měření a nasazení akustické kamery v terénu (použití a výběr algoritmu je závislý na vzdálenosti zdroje, jeho frekvenci, požadované přesnosti a dalších obdobných faktorech). Takto zpracovaný signál je pak přiřazen do obrazu, kde je intenzita jednotlivých zdrojů vyjádřena v hlukové mapě barevnou škálou. Je potřeba zdůraznit, že akustická kamera neslouží primárně k určení dosahovaných hladin hluku, ale k lokalizaci dominantních zdrojů hluku - například hlučných komponent, rezonujících součástek, netěsností, atp. Lokalizace (resp. odstranění) těchto zdrojů pak může významně snížit emitovanou akustickou energii a tedy i zatížení okolí hlukem.

Měření probíhalo s akustickou kamerou Bionic L-112. Zařízení je složené ze soustavy 112 MEMS mikrofonů uspořádaných do mikrofonního pole o průměru 1700 mm a optické kamery. Toto zařízení umožňuje měřit v rozsahu 10 – 24 000 Hz v hladinách hluku 33–120 dB.

In-situ měření - listopad 2020

Pro ověření výše uvedené hypotézy byla na lokalitě "Braník R04" realizována v průběhu listopadu 2020 dvojice měření ve dnech 3. 11. 2020 a 13. 11. 2020.

Akustická kamera byla umístěna do vzdálenosti 3,0 m od sledovaného kolejnicového pásu (pravý kolejnicový pás odbočující koleje ve směru Nádraží Braník) ve výšce 1,5 m. Poloha akustické kamery byla zvolena tak, aby byla na výsledných záznamech dobře patrná jak poloha svaru náběžné kolejnice, tak sledovaná srdcovka. Kamera byla umístěna do polohy uprostřed mezi sledované body. Pro snadnější zpracování i zobrazení výsledků byla poloha svaru náběžné kolejnice i střed srdcovky zvýrazněny lepicí páskou nalepenou na zádlážku. Toto zdůraznění sledovaných bodů je patrné na následujícím obrázku Obr. 2 vlevo ukazujícím pohled z kamery.



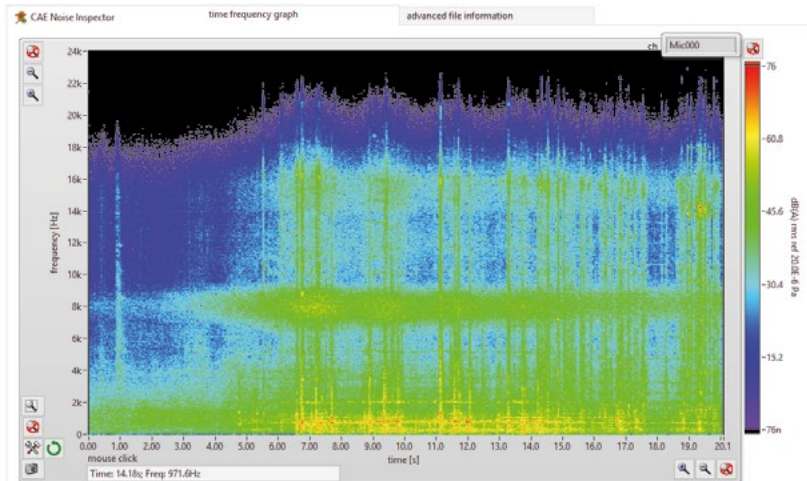
Obr. 2 Zorné pole akustické kamery se zvýrazněním zájmových bodů a prováděné měření dne 13. 11. 2020.

Na pohledu z akustické kamery (levá část Obr. 2) v pravém dolním rohu i pohledu na prováděné měření (pravá část Obr. 2) je patrný také mikrofon a zvukoměr BK-2250L souběžně prováděného měření. Výstupy a výsledky technického měření hluku, které je zde prováděno dlouhodobě, však nejsou součástí tohoto příspěvku a budou publikovány samostatně po vyhodnocení dlouhodobého monitoringu.

V rámci měření byly prováděny náměry spojů linky 2 a 3 odbočujících z hlavní tratě do obratiště Nádraží Braník. Linka 2 je obsluhována sólo vozy, nejčastěji tramvajemi typu T3R.P a nízkopodlažními T3R.PLF, linka 3 pak nejčastěji článkovými tramvajemi 14T a 15T. V rámci měření tak je na této lokalitě možné sledovat více typů tramvajových vozů, což je z pohledu tvorby závěrů velmi vhodné, neboť se i v rámci jiných měření ukázalo, že různé typy se (nejen) z pohledu akustiky chovají při průjezdu přes kolejové konstrukce odlišně [1].

4 VÝSLEDKY

Měření i vyhodnocování probíhalo v software NoiseInspektor. Vzhledem k rozsahu článku jsou níže zobrazeny a okomentovány jen dva průjezdy - průjezd čtyřnápravového dvoupodvozkového vysokopodlažního vozidla typu T3R.P a moderní článkové nízkopodlažní tramvaje 15T. Na následujícím obrázku Obr. 3 je zobrazen časový záznam akustické energie podle frekvencí při průjezdu tramvaje 15T měřícím profilem - tzv. "akustický otisk" průjezdu.



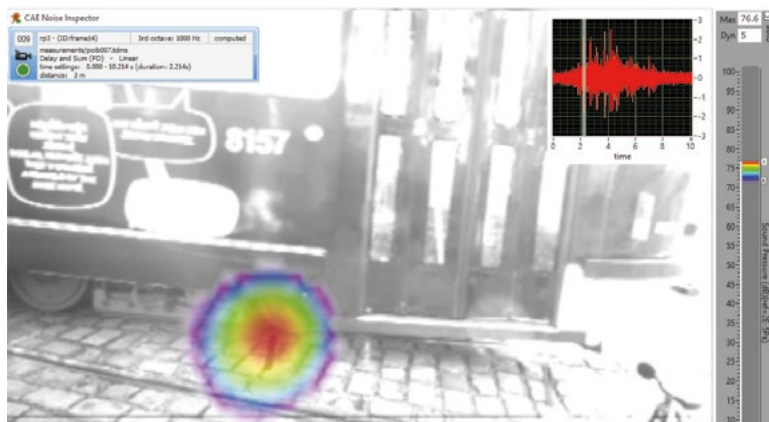
Obr. 3 Časový záznam akustické energie při průjezdu vozu 15T sledovaným profilem.

Ze záznamu na Obr. 3 je patrné, že nejvyšší podíl akustické energie je emitován na frekvencích cca 300–1200 Hz (červené oblasti). Další významné zdroje hluku jsou patrné v pásmu okolo střední frekvence 8 kHz. Ty souvisí s hlukem z pohonů, které pracují na střední frekvenci $4000 \text{ Hz} \pm 500 \text{ Hz}$ a souvisejících harmonických frekvencích. Toto zesílení signálu je nejlépe viditelné jako pás na frekvenci 8 kHz, ale patrné je i okolo frekvence 16 kHz. Tyto zdroje však nebyly předmětem řešené problematiky.

Za povšimnutí stojí i průběh akustické energie od průjezdu jednotlivých podvozků. Průjezd prvního podvozku je patrný v čase cca 6,5 - 7,75 s, druhý podvozek v čase cca 8,75 - 10,0 s, a tak dále. Je zřetelné, že průjezd každého podvozku přes kolejovou konstrukci má vždy tři významné vrcholy emitované energie: 1) průjezd první nápravy přes svar, 2) průjezd první nápravy přes srdcovku a zároveň druhé nápravy podvozku přes svar (způsobeno podobnou vzdáleností svaru od srdcovky - 2,05 m a vzdáleností náprav - 1,90 m) a 3) průjezd druhé nápravy přes srdcovku. Již tento výsledek naznačuje potvrzení vyslovené hypotézy.

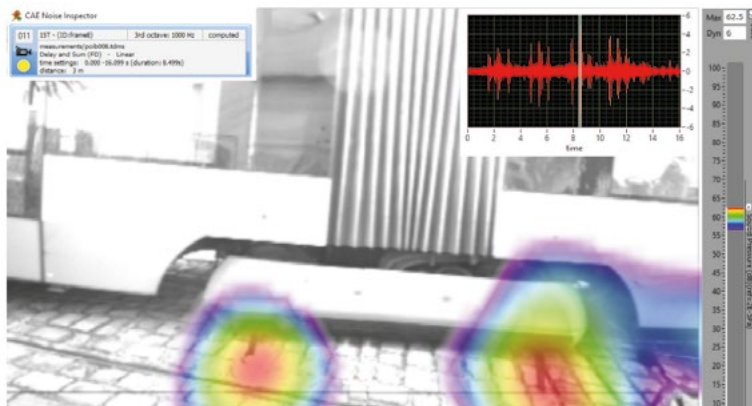
Od času cca 13,0 s do konce záznamu již splývá hluk od průjezdu 4. podvozku přes sledovanou oblast s hlukem od 1. a 2. podvozku pokračujících průjezdem přes srdcovky protisměrné koleje.

V rámci postprocessingu byla prováděna detailnější analýza průjezdů se zaměřením na konkrétní frekvenční pásma. Hodnocení se zaměřilo na nejvýznamnější složku emitované energie - tedy složky do frekvence 1 kHz. Uváděny jsou výsledky hodnocení formou jednotlivých snímků reprezentujících zjištěný stav.



Obr. 4 Průjezd vozu T3R.P přes svar náběžné kolejnice.

Na Obr. 4 je dobře zachycen stav vycházející z hodnocení při průjezdu vozu T3R.P. Na snímku je velmi dobře patrné, že ohnisko vznikající akustické energie - hluku - se nachází právě i na místě svaru náběžné kolejnice. Hodnocení proběhlo algoritmem DELAY and SUM, s dynamickou škálou zobrazování 5 dB. Výpočet proběhl pro pásmo frekvencí s rozsahem frekvencí se středem 1/3 oktávového pásma 1000 Hz.



Obr. 5 Průjezd vozu 15T přes svar náběžné kolejnice a srdcovku.

Obr. 5 zachycuje průjezd vozu 15T. Hodnocení proběhlo algoritmem DELAYandSUM, s dynamickou škálou zobrazování 6 dB. Výpočet proběhl pro pásmo frekvencí s rozsahem frekvencí se středem 1/3 oktávového pásma 1000 Hz. Na snímku je velmi dobře patrné, že při průjezdu vozu přes kolejovou konstrukci skutečně vznikají dvě ohniska akustické energie - hluku - a že místo svaru náběžné kolejnice je ze srdcovkou srovnatelným zdrojem. Tuto hypotézu znovu potvrzuje i graf zobrazující průběh akustické energie v čase (na snímku vpravo nahoře), kde jsou opět jasně patrné pro každý podvozek tři vrcholy emitované energie - 1) průjezd první nápravy přes svar, 2) průjezd první nápravy přes srdcovku a zároveň druhé přes svar a 3) průjezd druhé nápravy přes srdcovku. Lze tak potvrdit vyslovenou hypotézu, že z pohledu hlukové zátěže okolí je svar náběžné kolejnice srovnatelně problematický s průjezdem kol na přes rozjezdový hrot srdcovky.

5 ZÁVĚR

Měření akustickou kamerou prokázalo, že svar náběžné kolejnice umístěný před srdcovkou může být významným zdrojem emitované hlukové zátěže při průjezdu tramvajových vozů přes kolejovou konstrukci. V dalších fázích výzkumu bude pozornost zaměřena na vytipování problematických svarů, přesnější definování v tomto ohledu problematických vozů (po prvotním měření a hodnocení se některé vozy jeví v tomto pohledu problematičtější než jiné), a dále se pozornost zaměří na exaktní popis rovinatosti pojižděné plochy temen kolejnice resp. svaru. Tyto výsledky a závěry z měření budou publikovány v dalších fázích výzkumu.

Poděkování

Měření publikovaná v tomto příspěvku byla realizována za podpory projektu TAČR Zéta reg. č. TJ04000257 Dlouhodobý monitoring kolejových konstrukcí u tramvajových křižovatek se zaměřením na mělké srdcovky za účelem optimalizace jejich údržby a snížení hluku a projektu Studentské grantové soutěže registrační číslo SGS20/048/OHK1/1T/11 Studie kolejových konstrukcí tramvajových tratí a ověření správnosti výstupů měření nezávislými postupy.

Použité zdroje

- [1] BRET, Ondřej. Akustické sledování podvozku tramvaje 15T při průjezdu přes kolejové konstrukce. In: Akustika, vol. 33, září 2019. ISSN: 1801-9064.
- [2] KŘEČKOVÁ, Magdalena. Monitoring vybraných tramvajových srdcovek. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Bakalářská práce. 2020
- [3] ŠUROVSKÝ, Jan. Vztah kolo-kolejnice u tramvaji. DP-kontakt. Dopravní podnik hl.m. Prahy, 2009/1, ISSN 1212-6349.
- [4] ZELENKA, Jaromír a Martin KOHOUT. Vztah kolo-kolejnice v podmínkách tramvajového provozu. Plzeň: 46. zasedání odborné skupiny tramvajové tratě, Sdružení dopravních podniků ČR
- [5] PENC, Miroslav. Projekt Kolo-kolejnice. DP-kontakt. Praha: Dopravní podnik hlavního města Prahy, 2010/4, ISSN 1212-6349.
- [6] Dopravní a návěstní předpis D 1/2. Praha: Dopravní podnik hl. m. Prahy, a.s., účinnost od 1. dubna 2012.

VÝSLEDKY POROVNÁVACÍCH MĚŘENÍ RAYLEIGHOVA VLNĚNÍ IN SITU A VE ZKUŠEBNÍM BOXU

RESULTS OF COMPARATIVE MEASUREMENTS OF RAYLEIGH WAVE IN SITU AND IN TESTING BOX

Michal Petýrek^{*,1}, Leoš Horníček¹

*michal.petyrek@fsv.cvut.cz

¹Fakulta stavební ČVUT v Praze, Katedra železničních staveb, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6 - Dejvice

Abstrakt

V souvislosti s plánovanou výstavbou vysokorychlostních tratí v České republice je prováděn výzkum vlivu povrchového Rayleighova vlnění na kvalitu jízdní dráhy. Šíření vlnění bylo sledováno pomocí geofonů u železniční trati s maximální traťovou rychlostí 160 km/h v místech s rizikovou geologií a dále v prostředí hlinišť cihelny, kde se nachází kompaktní vrstva jemnozrnné zeminy s vysokou plasticitou. Vlnění bylo vybuzeno pádem závaží prostřednictvím standardizované lehké dynamické desky o průměru 300 mm. Zemina z hliniště byla odebrána a použita pro stavbu laboratorního modelu o rozměrech 1400 x 400 x 400 mm. Na ztuhnuté zemině bylo obdobným způsobem provedeno měření povrchového vlnění jako v prostředí hliniště. Článek prezentuje výsledky těchto porovnávacích měření. Zhodnoceny jsou amplitudy svislého vlnění a rychlost podélného šíření vlnění v daném prostředí.

Klíčová slova

Rayleighovo vlnění, laboratorní měření, in situ měření, geofon, kritická rychlost zeminy

Abstract

In the context of planned construction of high-speed lines in the Czech Republic, research focused on the surface Rayleigh waves and their impact to the quality of the railway track is being carried out. The propagation of the waves was monitored using geophones on measurement site near the railway line with maximum speed 160 km/h and in the brickyard's clay pit, where a compact layer of fine-grained soil with high plasticity is present. The waves were excited by the fall of the weight by means of a standardized light weight deflectometer with a diameter of 300 mm. Sample of soil was taken from the clay pit and used to build a laboratory model in test box with inner dimensions of 1400 x 400 x 400 mm. The surface waves were measured on the compacted soil in a similar way as in the clay environment. The article presents the results of these comparative measurements. The amplitudes of vertical waves and the speed of longitudinally propagated waves in the given environment are evaluated.

Key words

Rayleigh waves, laboratory measurement, in situ measurement, geophone, critical soil velocity

1 ÚVOD

V současnosti se v České republice připravuje výstavba pilotních úseků vysokorychlostních železničních tratí. Souběžně s tím je na vybraných úsecích stávajících konvenčních tratí posuzováno zvýšení stávající nejvyšší traťové rychlosti ze 160 km/h na 200 km/h, nebo je v rámci projektové přípravy jejich modernizace zvýšení traťové rychlosti na 200 km/h připravováno. V souvislosti se zvyšováním rychlosti jízdy vlaků, v případě vysokorychlostních vlaků dokonce násobným, se mohou začít objevovat dosud v našich podmínkách neznámé problémy, tak jako se tomu už stalo v nedávné minulosti v některých případech v zahraničí. Mezi tyto problémy patří také odezva podloží a okolí železničních tratí na vibrace generované rychle jedoucími vlakovými soupravami [1]. Na důležitost zabývat se dosud v ČR nesledovaným vlivem povrchového Rayleighova vlnění na kvalitu jízdní dráhy upozornila technicko-provozní studie "Technická řešení VRT", kterou v roce 2017 zpracoval SUDOP Praha

[2]. Problematika začala být systematicky řešena na Fakultě stavební ČVUT v Praze. Podrobná charakteristika Rayleighova vlnění a vztahu ke kritické rychlosti zeminy z pohledu železničních staveb je uvedena v [3].

2 METODIKA MĚŘENÍ RAYLEIGHOVA VLNĚNÍ

Pro dlouhodobější sledování Rayleighova vlnění v přirozených podmínkách v rámci České republiky byla vytipována lokalita nacházející se u 4. tranzitního koridoru poblíž Horusického rybníka. Maximální traťová rychlost ve sledovaném úseku je 160 km/h a podloží je tvořeno rizikovými jemnozrnnými zeminami. Podrobný popis lokality a výsledky prvotních měření z tohoto úseku jsou uvedeny v [4]. V roce 2020 byly v lokalitě u Horusice realizovány tři měřicí kampaně měření povrchových seismických vln generovaných projíždějícím vlaky.

K měření Rayleighova vlnění bylo využito 8 geofonů typu SM6 s vlastní frekvencí 4.5 Hz, uspořádaných do stanoveného měřicího profilu (viz Obr. 1). Použití tohoto typu snímačů bylo zvoleno na základě zahraničních zkušeností. Geofony byly uloženy do speciálního plastového pouzdra s trnem a umístěny na povrch železničního tělesa a přilehlého okolí pomocí tak, že horní povrch plastového pouzdra byl v úrovni terénu. Měření bylo řízeno pomocí notebooku a měřené hodnoty byly zaznamenány pomocí měřicí ústředny s frekvencí 2 000 Hz. Další zpracování změřených dat probíhalo s využitím specializovaného softwaru.

Během měření byla kromě odezvy podloží na projíždějící vlaky měřena i odezva na rázy vyvolané dopadem závaží na ocelovou desku. K buzení povrchových seismických vln byla použita standardní lehká dynamická deska o průměru 30 cm a závažím o hmotnosti 10 kg.

V rámci výzkumu je ověřována i realizovatelnost výzkumu v laboratorních podmínkách. Původním záměrem bylo provést laboratorní měření na modelu s využitím zeminy z lokality Horusice a porovnat výsledky z měření in situ a v laboratoři. Vzhledem k tomu, že zájmová lokalita se nachází v přírodní rezervaci, nebyl odběr zeminy možný. Jako náhradní řešení byl zvolen odběr materiálu podobných parametrů z hliniště cihelny. V prostoru hliniště bylo rovněž provedeno měření šíření povrchových vln s požitím geofonů a lehké dynamické desky.

Metodika použitá pro měření v hliništi cihelny a v laboratorní boxu je popsána níže. Vzdálenosti geofonů byly zvoleny tak, aby bylo možné výsledky měření vzájemně porovnat s výsledky z lokality Horusice.

3 POPIS MĚŘENÍ VE SLEDOVANÝCH LOKALITÁCH

Řepov

Ložisko Řepov se nachází nedaleko Mladé Boleslavi u stejnojmenné obce. Na ložisku je dobývána cihlářská surovina, která je využívána v nedaleké cihelně. V současné době je ložisko otevřeno pomocí 6 těžebních úrovní. Výška každé etáže je cca 3 m, šířka etáže je minimálně 8 m. Povrch etáže je upraven v příčném sklonu 2–5 % pro zajištění odtoku srážkových vod. V horních třech etážích je v ložisku dobývána sprašová zemina, tzv. cihlářská žlutka, v dolní partii ložiska jsou dobývány černé slínovce [5]. Vlastní těžba je prováděna pomocí čelních nakladačů nebo rypadel a vyzetá surovina je odvážena pomocí nákladních automobilů. Měření bylo provedeno na druhé nejsvrchnější etáži - na sprašových hlinách. Během měření těžba neprobíhala, a tak nejsou výsledky měření ovlivněny souvisejícími rušivými vlivy.

Horusice

Měření v lokalitě Horusice probíhají na dvoukolejném úseku na 4. železničním koridoru mezi žst. Dynín a zast. Horusice. Tento úsek byl modernizován v letech 2014–2016. V uvedeném úseku trať kříží mělké údolí Bukovského potoka nově vybudovanou přeložkou. Údolí trať překračuje pomocí mostního objektu, na který z obou stran navazuje násep výšky přibližně 5 m, která pozvolna klesá se vzdáleností od objektu. Podloží v okolí železniční tratě je v těchto místech tvořeno do hloubky cca 5 m neúnosnými a stlačitelnými rašelinami a jíly se sníženou konzistencí. V lokalitě je též vysoká hladina spodní vody, která se nachází cca 0,5–0,8 m pod povrchem terénu.

Porovnání zemin vyskytujících se na obou lokalitách

V obou lokalitách byl v prostoru měřicího profilu proveden odběr vzorků zeminy z povrchu terénu (v případě lokality Horusice pod vegetační vrstvou) a provedeny geotechnické zkoušky v akreditované laboratoři. Porovnání parametrů zemin v obou lokalitách je uvedeno v Tab. 1. Pro lokalitu Horusice jsou uvedeny dva údaje, neboť

měřicí profil postihuje jak vlastní železniční násep (označeno "násep"), tak přilehlý rostlý terén (označeno "louka"). Jak je z výsledků patrné, parametry zemin v obou lokalitách jsou podobné.

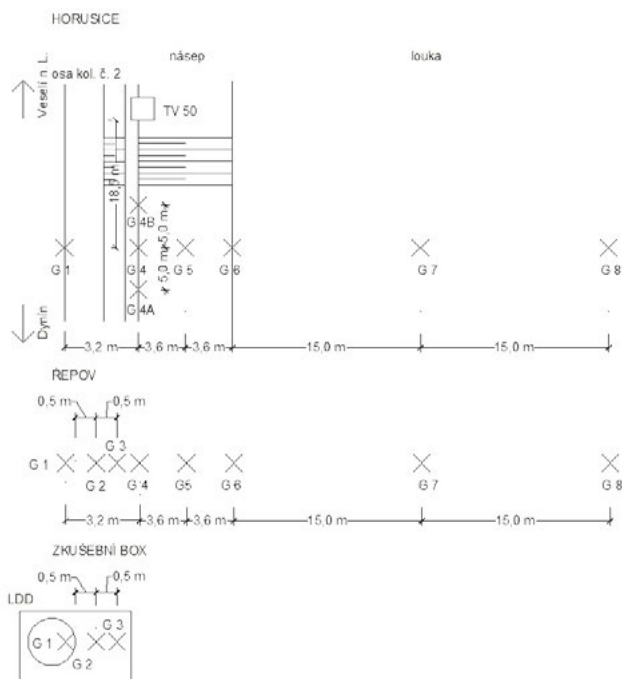
Tab. 1 Parametry zemin na lokalitě Horusice a Řepov.

	Horusice násep	Horusice louka	Řepov
Klasifikace zeminy ČSN EN ISO 14688-2	Cl	Cl	Cl
Klasifikace zeminy ČSN 73 6133	F7 MH	F7 MH	F8 CH
Vlhkost %	33,1	54,5	31,0

4 METODIKA MĚŘENÍ IN SITU

Uspořádání měřicího profilu v lokalitě Řepov

Poloha geofonů v měřicím profilu v lokalitě Řepov byla zvolena tak, aby odpovídala poloze geofonů v lokalitě Horusice. Navíc byly doplněny 2 geofony ve vzdálenosti 0,5 m a 1,0 m od okraje zatěžovací desky pro vzájemné porovnání výsledků s měřeními ve zkušební boxu v laboratoři. Uspořádání a označení geofonů v lokalitách Horusice a Řepov je uvedeno na Obr. 1. Do schématu pro lokalitu Řepov je vyznačeno i uspořádání pro zkušební box.



Obr. 1 Schéma uspořádání měřicích profilů.

Postup měření in-situ

Po příjezdu na lokalitu Řepov bylo zvoleno přesné umístění měřicího profilu tak, aby s ohledem na výskyt zemin požadovaných parametrů byla zajištěna pokud možno co největší shoda s podmínkami v lokalitě Horusice. Před měřeními byla poloha jednotlivých geofonů označena pomocí výtyček (Obr. 2). Po zapojení geofonů pomocí kabelů do měřicí ústředny bylo zahájeno vlastní měření. Seizmické vlny byly postupně buzeny lehkou dynamickou

deskou u všech geofonů. Před vlastním měřením byl proveden konsolidační ráz pro dosednutí zatěžovací desky prostřednictvím pádu závaží z výšky 10 cm. Buzení rázových pulzů probíhalo tak, že nejprve bylo třikrát upuštěno závaží bez jeho zachycení, což způsobilo několik následných dopadů závaží, následovaly tři rázy, kdy závaží bylo po prvním odskoku od zatěžovací desky zachyceno a nakonec bylo závaží opět třikrát upuštěno bez jeho zachycení. Pokud nebylo závaží zachyceno, byl zaznamenán počet a intenzita následných rázů. Po ukončení měření byl odebrán vzorek zeminy pro použití do modelu ve zkušební boxu v laboratořích Fakulty stavební ČVUT v Praze.

5 METODIKA LABORATORNÍHO MĚŘENÍ

Popis upořádání zkoušky ve zkušební boxu

Použit byl zkušební box s vnitřními rozměry: délka 1 400 mm, šířka 400 mm a výška 400 mm. Zkušební box je zhotoven z dřevotřískových desek v povrchové úpravě lamino. Dřevotřískové desky byly k sobě spojeny pomocí vrutů a úhelníků. Po vnějším obvodu zkušební boxu byl vyroben ztužující rám šířky 70 mm a tloušťky 18 mm.

Před vyplněním zkušební boxu zeminou byl zkušební box vyložen fólií pro zamezení změny vlhkosti zeminy. Zemina byla hutněna ručním vibračním pěchem v 6 vrstvách o tloušťce 4-6 cm, každá vrstva byla hutněna 5 minut. Celková tloušťka vrstvy zeminy ve zkušební boxu po ztuhnutí byla 330 mm. Uspořádání snímačů a zatěžovací desky ve zkušební boxu je uvedeno v Obr. 2.

K měření bylo využito stejné přístrojové vybavení jako pro měření v terénu. Zatěžování modelu bylo provedeno shodně se zatěžováním při měření v hliništi. Měření ve zkušební boxu bylo realizováno dvakrát, a to zrcadlově ve dvou polohách. Při změně polohy zatěžovací desky ve zkušební boxu byla změněna poloha geofonů tak, aby odpovídala schématu.



Obr. 2 vlevo - Měřicí profil v lokalitě Řepově, vpravo - Laboratorní model ve zkušební boxu.

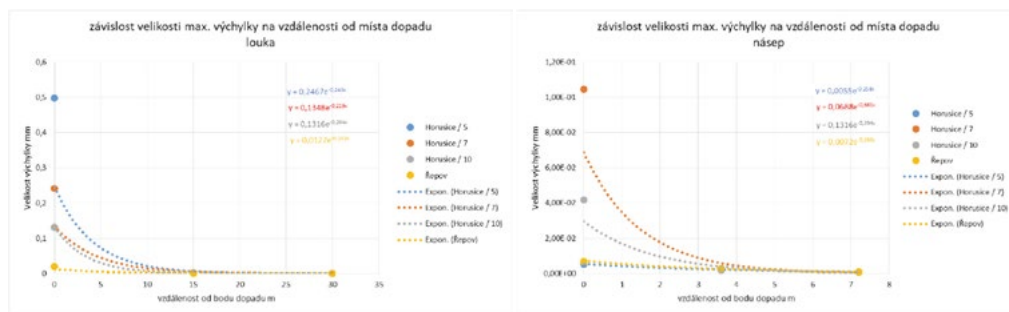
6 VÝSLEDKY

K vyhodnocení naměřených dat byl použit software Sigview verze 4.2. V rámci vyhodnocení byl sledován tvar amplitud a jejich šíření v čase. Pro měření ve zkušební boxu a v Řepově byly velikosti výchylek pro geofony G 1, G 2 a G 3 zprůměrovány pro každou sadu úderů. Variační koeficient (poměr směrodatné odchylky a průměru) se pohybuje do 5 %. Protože velikosti výchylek pro všechny sady úderů, ať už bez zachycení závaží nebo s jeho zachycením, jsou prakticky shodné, byly pro další zpracování použity pouze velikosti výchylek prvních tří úderů. Souhrnné výsledky jsou uvedeny v Tab. 2. Sloupec s kladnými výchylkami je označen symbolem plus a se zápornými výchylkami symbolem minus.

Tab. 2 Průměrná velikost maximálních kladných a záporných výchylek.

geofon	hliniště		zk. box A		zk. box B	
	+	-	+	-	+	-
G 1 [mm]	1,988	-1,889	2,081	-1,803	2,032	-1,852
G 2 [mm]	0,018	-0,020	0,209	-0,259	0,102	-0,164
G 3 [mm]	0,012	-0,012	0,514	-0,264	0,400	-0,232

Dále byly pro všechna měření v Horusicích a Řepově porovnány maximální kladné výchylky. Výchylky byly porovnány zvlášť pro zatěžování u geofonu G 4 a G 8. Pro zatěžování u geofonu G 8 byly vyhodnoceny velikosti výchylek u geofonů G 8, G 7 a G 6. Tyto tři geofony popisují chování podloží okolí železniční trati. Pro zatěžování u geofonu G 4 byly vyhodnoceny geofony G 4, G 5 a G 6. Tyto geofony popisují chování železničního náspu. Grafy popisující velikost výchylek jsou uvedeny na Obr. 3. Naměřenými daty byly proloženy exponenciální spojnice trendu. Jejich rovnice popisuje útlum velikosti maximální výchylky vlnění v závislosti na vzdálenosti od zdroje.



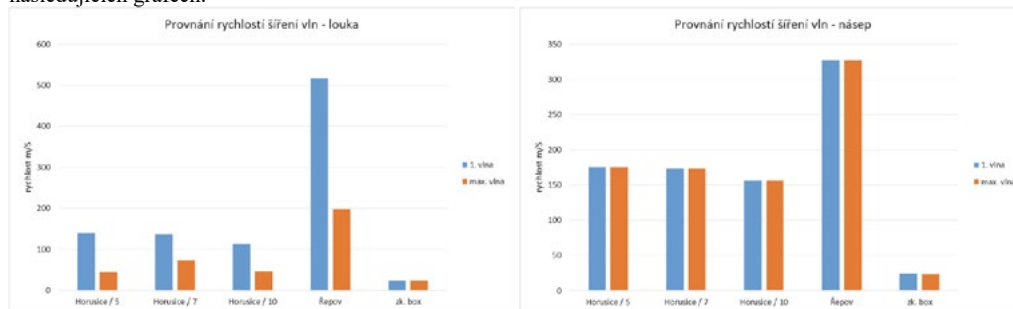
Obr. 3 vlevo - Graf změny velikosti výchylek - louka, vpravo - Graf změny velikosti výchylek - násep.

Na Obr. 3 vlevo odpovídá vzdálenost 0 m geofonu G 8, 15 m geofonu G 7 a 30 m geofonu G 6, budící ráz byl generován u geofonu G 8. Na Obr. 3 vpravo odpovídá vzdálenost 0 m geofonu G 4, 3,6 m geofonu G 5 a 7,2 m geofonu G 6, budící ráz byl generován u geofonu G 4. Získané rovnice exponenciálních funkcí popisujících změnu velikosti výchylky jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 3 Funkční vyjádření velikosti výchylky ve vztahu ke vzdálenosti

místo	Horusice 05/2020	Horusice 07/2020	Horusice 10/2020	Řepov 10/2020
louka	$y = 0,2467e^{-0,243x}$	$y = 0,1348e^{-0,219x}$	$y = 0,1316e^{-0,294x}$	$y = 0,0122e^{-0,162x}$
násep	$y = 0,0055e^{-0,258x}$	$y = 0,0688e^{-0,681x}$	$y = 0,1316e^{-0,294x}$	$y = 0,0072e^{-0,286x}$

Dále byla vyhodnocena rychlost šíření vybuzených povrchových vln. Pro výpočet časového rozdílu mezi průchodem vln jednotlivými geofony byly zvoleny dva časové okamžiky, a to počátek průchodu vlnění (1. kladná výchylka) a okamžik maximální kladné výchylky. Rychlost byla vyhodnocena pro všechna měření v Horusicích, Řepově i ve zkušebním boxu. Pro měření v Horusicích a v Řepově byla rychlost šíření vlnění zvlášť posuzována pro geofony umístěné na louce (geofony G 6, G 7 a G 8), a pro geofony umístěné na náspu (geofony G 4, G 5 a G 6). Vlnění bylo buzeno u geofonů G 4 a G 8. Obdobným způsobem byla vyhodnocena rychlost šíření vlnění ve zkušebním boxu pro geofony G 2 a G 3. Spočtené rychlosti šíření povrchových vln jsou porovnány na následujících grafech.



Obr. 4 vlevo - Graf porovnání rychlostí - louka, vpravo - Graf porovnání rychlostí - násep.

7 ZÁVĚR

Cílem experimentů bylo získat data o šíření Rayleighova vlnění v reálných podmínkách a porovnat je s výsledky v laboratorních podmínkách ve zkušebním boxu při použití stejné zeminy. V rámci porovnání byly sledovány dva parametry, a to velikost výchylek a rychlost šíření vlnění. V obou sledovaných parametrech byly zjištěny odlišné hodnoty v obou sledovaných lokalitách i ve zkušebním boxu. Největší výchylky ve zkušebním boxu byly zaznamenány o řád větší než in situ, a to i přesto, že pokles zatěžovací desky byl v obou případech takřka shodný. Rozdíl je zjevně způsoben okrajovými podmínkami zkušebního boxu, neboť model má omezené rozměry a ze všech stran i zespoda je ohraničen tuhými plochami. Zatímco v přirozeném prostředí se může vnesený impuls volně šířit do okolí všemi směry, v případě laboratorního prostředí je možnost prostorového šíření omezena. V zásadě se povrchové vlnění může šířit pouze v podélném směru zkušebního boxu, v ostatních třech směrech se ve vzdálenosti 5 cm od hrany zatěžovací desky nachází tuhé stěny zkušebního boxu. Energie předaná pádem závaží se tak koncentruje do jediného volného směru, s čímž lze dát do přímé souvislosti významně vyšší velikost výchylek změřených ve zkušebním boxu než změřených in situ. Další vliv spatřujeme i v samotné vrstvě zeminy. Zatímco v hliništi probíhalo měření na rostlé homogenní zemině v přirozeně ulehlem stavu, ve zkušebním boxu na uměle vytvořeném modelu, kdy zemina byla sice zhutněna, ale spolupůsobící tloušťka vrstvy jistě není shodná. Velikost výchylek zjištěných v lokalitě Horusice i Řepov jsou podobné s výjimkou maximální výchylky u geofonů, u kterých bylo generováno vlnění. V tomto případě byly hodnoty v Horusicích zjištěny nižší.

Při porovnání rychlostí šíření povrchové vlny je patrné, že i v tomto případě byly zjištěny odlišné rychlosti šíření vlnění jak v jednotlivých lokalitách in situ, tak ve zkušebním boxu. V lokalitě Řepov byla zjištěna rychlost pro geofony G 4 až G 6 327 m/s (rychlost byla shodná jak pro první vlnu, tak pro vlnu s maximální výchylkou) a pro geofony G 6 až G 8 (rychlost 168 m/s rychlost byla shodná jak pro první vlnu, tak pro vlnu s maximální výchylkou), zatímco v lokalitě Hrusice byla pro geofony G 4 až G 6 zjištěna rychlost 517 m/s pro první vlnu a 198 m/s pro maximální vlnu a pro geofony G 6 až G 8 rychlost 129 m/s pro první vlnu a 55 m/s pro maximální vlnu. Rychlost šíření vlnění ve zkušebním boxu byla zjištěna přibližně poloviční oproti lokalitě Horusice. Navíc v případě zkušebního boxu je výpočet rychlosti na krátkou vzdálenost citlivý na přesné určení polohy geofonů.

Lze tedy konstatovat, že rychlosti šíření vlnění na povrchu zeminy je třeba stanovovat na výrazně větší vzdálenost, než byla vzdálenost geofonů ve zkušebním boxu (0,5 m). Rychlost šíření vlny zjištěná ve zkušebním boxu může být dále zatížena okrajovými podmínkami zkušebního boxu.

Závěrem lze konstatovat, že výsledky zjištěné ve zkušebním boxu nejsou přímo porovnatelné s hodnotami získanými v reálných podmínkách. Další výzkum tak bude zaměřen na tvorbu matematického modelu elementu kolejové tratě s hodnocením vlivu Rayleighova vlnění a verifikaci dat v reálných podmínkách.

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS 161-1612049A137.

Použitá zdroje

- [1] HU, Jing, Xuecheng BIAN a Jianqun JIANG. Critical Velocity of High-Speed Train Running on Soft Soil and Induced Dynamic Soil Response. In: *Procedia Engineering: Advances in Transportation Geotechnics 3. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics* [online]. Elsevier, 2016, s. 1034–1042 [cit. 2018-11-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816305422>
- [2] Technicko-provozní studie Technická řešení VRT. SUDOP Praha, 2017.
- [3] PETÝREK, M. a L. HORNÍČEK. Rayleighovo vlnění a kritická rychlost zeminy z pohledu železničních staveb. In: *Juniorstav 2020, Sborník příspěvků*. Brno: VUT v Brně, FAST, 2020. p. 217-221. ISBN 978-80-86433-73-8.
- [4] PETÝREK, M. a L. HORNÍČEK. První výsledky měření Rayleighova vlnění v lokalitě Horusických blat. In: *Sborník studentské vědecké konference Železniční výzkumné aktivity ŽELVA 2020*. Praha: Czech Technical University in Prague, 2020. p. 74-84. ISBN 978-80-01-06765-9.
- [5] Pokračování Těžby cihlářské suroviny na výhradním ložisku Řepov. Portal.cenia.cz [online]. [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&ret=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja-&uact=8&ved=2ahUKEwiH0qSnjubsAhWSAGMBHZYjC_gQFjAAegQIBRAC&url=https%3A%2F%2Fportal.cenia.cz%2Fciasea%2Fdownload%2FRUIBX1NUQzExNDZfb3puYW11bmlET0NfMS5kb2M%2FSTC1146_oznameni.doc&usg=AOvVaw3XycZyTkhaNo3n93nmG6aw

3.

Konstrukce, stavební zkušebnictví a geotechnika

Structures, Building Testing and Geotechnics

ÚNOSNOST ZTUŽUJÍCÍCH ŽELEZOBETONOVÝCH STĚN S OTVOREM

LOAD CARRYING CAPACITY OF THE REINFORCED CONCRETE SHEAR WALLS WITH AN OPENING

Ondřej Šimek^{*,1}, Miloš Zich¹

*simek.o@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Článek uvádí výsledky experimentů železobetonových stěn s otvorem, které byly vyzkoušeny na únosnost ve směru diagonály. Jedná se o stěny, představující ztužující stěny ve vícepatrových prefabrikovaných rámových skeletech. Na navržených stěnách je studován vliv různého typu vyztužení na jejich únosnost a deformaci. Data, které jsou získána experimentem jsou poté ověřována výpočetními modely, které představují chování vzorků za experimentu. Výsledky modelů jsou porovnány mezi sebou a poté jsou zhodnoceny jejich klady a zápory.

Klíčová slova

Ztužující stěna, typ vyztužení, únosnost, deformace, stěna s otvorem

Abstract

The article presents the results of experiments of reinforced concrete walls with an opening, which have been tested for load carrying capacity in the diagonal direction. These are the walls that represent shear walls in multi-storey precast concrete frame structures. The influence of various types of reinforcement on their load carrying capacity and deformation is studied on the designed walls. The data obtained by the experiment is then validated by computational models that represent the behavior of the samples during the experiment. The results of the models are compared between each other and pros and cons are assessed.

Key words

Shear wall, type of reinforcement, load carrying capacity, deformation, wall with an opening

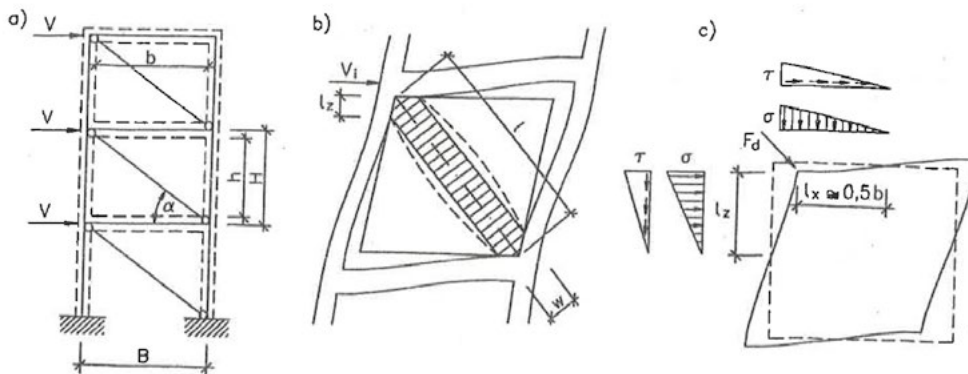
1 ÚVOD

V budovách jejíž nosnou konstrukci tvoří železobetonový skelet jsou často umístěny železobetonová jádra nebo železobetonové stěny jejichž úkolem je zajištění patřičné tuhosti konstrukce proti vodorovnému zatížení, například větru. Pokud mají tyto stěny za úkol pouze přispívat k tuhosti celé konstrukce, tak jsou rozhodující především rozměry stěny, nikoliv vyztužení. Tato skutečnost umožňuje často návrh stěn z prostého nebo slabě vyztuženého betonu. Může se stát, že vznikne potřeba vyřezat do stěny otvor, ať už z technologických nebo dispozičních důvodů. Pokud se tak stane, je třeba znovu posoudit nově vzniklé namáhání stěny, stejně tak jako nové globální působení celé budovy, jejíž ztužující systém byl takovou úpravou oslaben.

Cílem experimentu a analýzy bylo ověřit chování ztužujících stěn, do nichž je proveden dodatečný otvor. Mimo to byl účel ověřit vliv různých typů vyztužení, které by mělo vliv na únosnost a deformaci obdobných stěn. Pro ověření namáhání stěn s nově vzniklým otvorem bylo vyrobeno 2×4 samostatných stěn, které byly různě vyztuženy, viz Obr. 2. Od každého vzorku byly vyrobeny dva kusy. Tyto samostatné stěny simulují betonový prefabrikát stěny, umístěný v železobetonovém skeletu. Stěny byly vyzkoušeny v laboratořích Admas na VUT v Brně. Po provedení experimentů bylo chování stěn ověřeno třemi výpočetními modely. Cílem experimentu a následného modelování bylo získat relevantní data k ověření vhodného způsobu vyztužování a navrhování obdobných stěn, popřípadě jejich zesilování dodatečně vlepopanou výztuží.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Návrh ztužujících stěn je již velmi dobře popsán jak v zahraniční [2], tak domácí literatuře [1]. Navržené postupy se detailně zabývají návrhem jak betonových, tak zděných výplní bez otvoru, včetně zohlednění tuhosti ohraničující rámové konstrukce, pomocí nichž se určí kontaktní plochy (Obr. 1c), ve kterých je výslednice síly vnášena do ztužující stěny. V literatuře [1] spočívá návrh takových stěn ve stanovení šířky vzpěry (Obr. 1b), která představuje únosnost ztužující stěny a následně je použita pro výpočet deformace celého posuzovaného úseku budovy, Obr. 1a. Návrh těchto konstrukcí je popsán ve formě grafů a výpočetních vztahů.



Obr. 1 Postup návrhu ztužující stěny [1].

Výpočet únosnosti stěn s otvorem pro různé konfigurace velikosti a rozmístění otvorů je popsán v řadě odborných článků, např. [3]. Článek je rešerší odborných článků, které se však zabývají pouze svislou únosností takových stěn. Je zde analyzováno chování stěn se svislým zatížením pod záměrnou excentricitou a jsou zde zohledňovány okrajové podmínky, například že stěna působí v jednom, či v obou směrech. Únosnost těchto stěn s otvorem lze potom vypočítat dle vzorce (1)

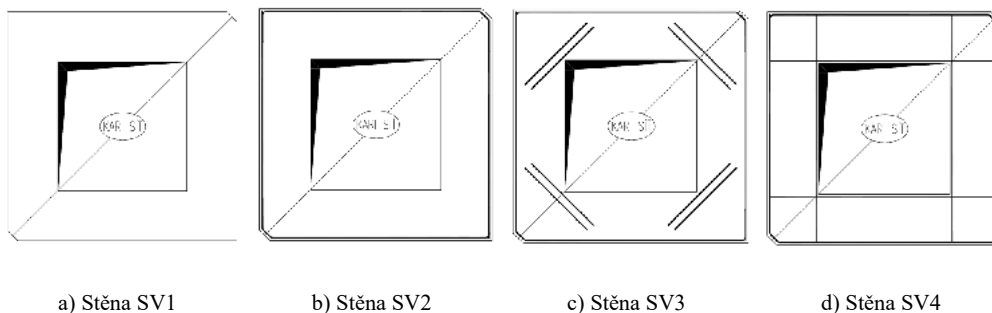
$$N_{u0} = (k_1 - k_2 \alpha_{xy}) N_u \quad (1)$$

Kde N_{u0} je únosnost stěny s otvorem; k_1 a k_2 jsou konstanty; α_{xy} je součinitel popisující velikost a polohu otvoru; N_u je únosnost stěny bez otvoru

Návrh ztužujících stěn s otvorem není v dostupné literatuře blíže popsán. Navíc, u takto zatížených stěn je mimo velikost stěny a otvoru důležité vyztužení, které, pokud je správně provedeno, má nemalý vliv na únosnost a deformační schopnosti ztužující stěny, popřípadě celé budovy.

3 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

K experimentálnímu ověření chování stěn s otvorem byly vyrobeny vzorky rozměrů 1600×1600 mm a tloušťky 75 mm. Charakter zatížení tohoto typu stěny v reálné rámové konstrukci je tzn. diagonální výslednice síly díky deformaci rámu pod vodorovnou silou (Obr. 1b). Zatížení zkušebních vzorků bylo provedeno tak, že se stěna postavila na "kosočtverec" a zatížila se z vrchu, bez excentricity, pro vyvození pouze stěnových sil bez ohybových účinků (Obr. 3). Stěny jsou různě vyztuženy: od jednoduchého vyztužení kari sítí (Obr. 2a) nebo kombinací kari sítě a obvodové vyztuže (Obr. 2b). Další dva vzorky jsou vyztuženy kari sítí s obvodovou vyztuží a úpravou kolem otvoru, v jednom případě šikmou vyztuží (Obr. 2c), v druhém vodorovnými a svislými pruty kolem otvoru (Obr. 2d). Kari sítě vzorků byly $\phi 6$ s oky 100×100 mm. Doplňující vázané vyztuže byly $\phi 10$, všechny vyztuže byly kladeny pouze v jedné vrstvě. Zkušební sestava byla vybavena snímači vodorovného a svislého posuvu, odporovými tenzometry a indukčnostními snímači v důležitých měříčských bodech, viz Obr. 3.

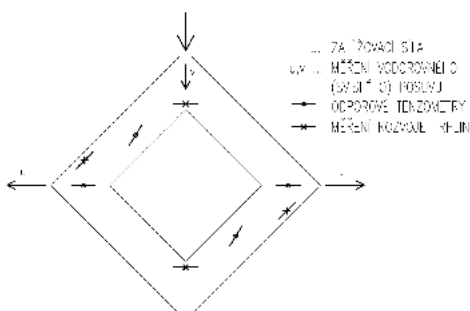


Obr. 2 Stěna SV.

4 ANALÝZA NAMÁHÁNÍ

Pro modelování všech vzorků, které byly podrobeny experimentu byly zvoleny celkem tři typy výpočetních modelů. První sada modelů byla modelována v softwaru Atena [4], který pracuje s principy lomové mechaniky a umožňuje zohlednit geometrickou a materiálovou nelinearitu v průběhu zatěžování, Obr. 5. Druhá sada výpočetových modelů byla analyzována v softwaru IDEA Detail [5], Obr. 6. Tento program pracuje s metodou tlakových polí (CSFM), která je podrobnější verzí klasické metody vzpěra-táhlo (SaT) [6]. Metodou SaT byly podrobeny výpočetové modely třetí sady, Obr. 7 (čárkovaně vzpěry; plně táhla).

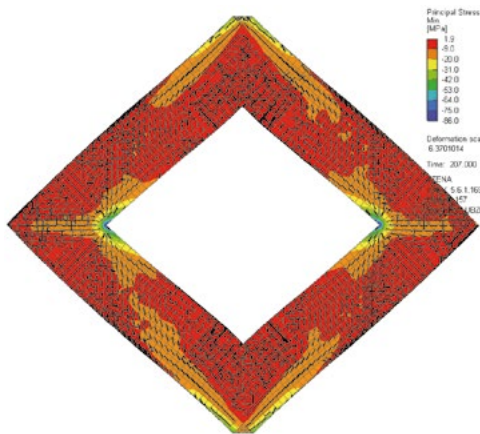
Při experimentu byly měřeny svislé a vodorovné deformace. Získaná data byla použita k porovnání se dvěma prvními modely (Atena a IDEA Detail). Dále byl v průběhu experimentu snímán tok tlakového přetvoření v rozhodujících místech na stěně pomocí odporových tenzometrů, viz Obr. 3. Tato data byla nápomocna k sestavení modelu vzpěra-táhlo (SaT). Pro všechny výpočetové modely experimentu byly použity skutečné materiálové charakteristiky betonu, které byly zjištěny na zkušebních tělesech. Zjištěné krychelné pevnosti betonu v tlaku se pohybovaly od 55,7 do 63,5 MPa. Pro všechny tři modely byly použity pracovní diagramy výztuže se střední hodnotou mezi kluzu a se zpevněním.



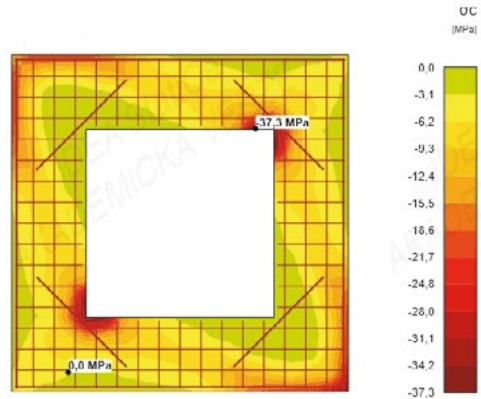
Obr. 3 Schéma experimentu.



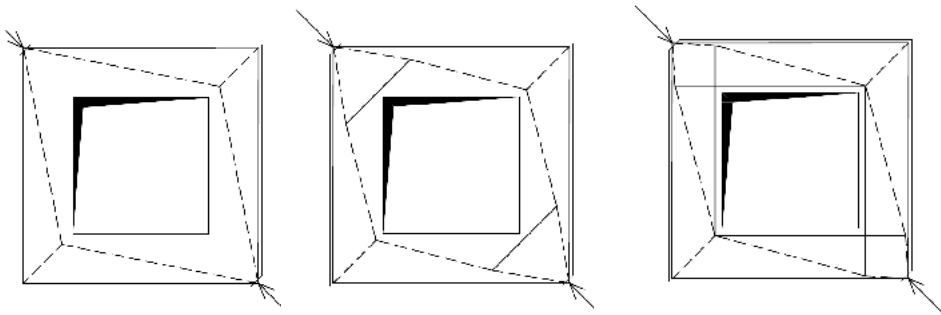
Obr. 4 Provádění experimentu stěny.



Obr. 5 Výpočetní model - Atena.



Obr. 6 Výpočetní model - IDEA Detail.



a) SaT model - stěna SV2.

b) SaT model - stěna SV3.

c) SaT model - stěna SV4.

Obr. 7 Výpočetní model - SaT.

5 VÝSLEDKY

Z experimentů bylo logicky zjištěno, že vzorek SV1, který je vyztužen pouze kari sítí má nejnižší únosnost z navržených vzorků. Pokud je přítomna obvodová vyztuž (vzorek SV2), tak se únosnost stěny zvýší přibližně dvojnásobně. Pokud se nadále zvolí některá z úprav vyztužení otvoru (SV3 nebo SV4), potom lze očekávat až trojnásobně vyšší únosnost oproti vzorku SV1, viz Tab. 1.

Analýza modelů ze softwaru Atena vykazuje až o 18 % vyšších únosnost, než bylo dosaženo experimentem. Svislé deformace jsou rozdílné až o 18 %, vodorovné pak až o 37 %. Analýza modelů ze softwaru IDEA Detail dosahuje rozdílů u mezních sil až 19 %, jak na stranu bezpečnou (vzorek SV2), tak na stranu nebezpečnou (vzorek SV4). Výpočtené deformace jsou v tomto případě vyšší než ze softwaru Atena. Rozdíly jsou u svislých deformací až do 81 %, u vodorovných pak do 66 %. Model vzpěra-táhlo (SaT) vykázal nejhorší výsledky. Rozdíly u mezních sil byly až do 78 %. Deformace těchto modelů nelze porovnat s experimentem, protože výpočet deformací nelze v těchto modelech provést. Hodnoty z výpočtových modelů, které jsou nejbližší k naměřeným jsou v Tab. 1 vyznačeny tlustě.

Při porovnání mezních dosažených sil jsou výsledné hodnoty z programu Atena i IDEA Detail podobné. Program Atena je však konzistentní v typu výsledků. Modely dosáhly mezi o 10 až 18 % větších únosnost než experiment. Naproti tomu, výsledky z programu IDEA Detail vykazují jak větší únosnosti než v experimentu (SV2) tak i menší únosnosti (SV1, SV3 a SV4).

Tab. 1 Porovnání výsledků experimentu s modely.

Zkoušený vzorek		F v kN	F_{exp}/F_{model}	svislá deformace v [mm]	v_{exp}/v_{model}	vodorovná deformace u [mm]	u_{exp}/u_{model}
SV1	Experiment	54,45	–	9,77	–	6,01	–
	Atena	63,76	0,85	8,29	1,18	6,60	0,91
	IDEA Detail	58,50	0,93	5,94	1,64	5,26	1,14
	SaT	–	–	–	–	–	–
SV2	Experiment	94,26	–	11,76	–	6,70	–
	Atena	115,01	0,82	11,60	1,01	8,56	0,78
	IDEA Detail	79,30	1,19	6,51	1,81	5,73	1,17
	SaT	58,85	1,60	–	–	–	–
SV3	Experiment	138,06	–	9,90	–	5,00	–
	Atena	158,60	0,87	10,30	0,96	7,90	0,63
	IDEA Detail	141,30	0,98	10,32	0,96	8,95	0,56
	SaT	77,52	1,78	–	–	–	–
SV4	Experiment	141,52	–	9,18	–	4,50	–
	Atena	157,74	0,90	9,20	1,00	6,52	0,69
	IDEA Detail	174,90	0,81	15,63	0,59	13,58	0,33
	SaT	88,90	1,59	–	–	–	–

6 ZÁVĚR

Byly porovnány výsledky experimentů ztužujících stěn s otvorem s výsledky různých výpočetních modelů, a to sice mezní dosažené mezní síly, svislé a vodorovné deformace. Výsledky analýzy výpočetních modelů byly porovnány mezi sebou a byly zhodnoceny klady a zápory jednotlivých modelů. Jako nejspolehlivější se ukázaly modely softwaru Atena, který vykazoval nejvěrohodnější výsledky v porovnání s experimentem i navzdory vyšších dosažených únosností. Výsledky těchto experimentů a modelů poslouží dále pro vytvoření vhodného výpočetního postupu pro návrh a posouzení různě vyztužených ztužujících stěn s otvorem.

Poděkování

Článek byl řešen v rámci projektu FAST-J-20-6438 Vliv šikmé výztuže v rozích dodatečně provedeného otvoru.

Použité zdroje

- [1] ČÍRTEK, Ladislav. Betonové konstrukce II: konstrukce prutové a základové. Brno: VUTIUUM, 1999. ISBN 80-214-1543-6.
- [2] ELLIOTT, Kim S. a Colin K. JOLLY. Multi-storey precast concrete framed structures. [Second edition]. Chichester: Wiley-Blackwell, 2013. ISBN 978-1-4051-0614-6.
- [3] POPESCU, Cosmin, Gabriel SAS, Thomas BLANKSVÁRD a Björn TÄLJSTEN. Concrete walls weakened by openings as compression members: A review. Engineering Structures [online]. 2015, 89, 172-190 [cit. 2020-10-08]. ISSN 01410296. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2015.02.006
- [4] ČERVENKA, Vladimír, Libor JENDELE a Jan ČERVENKA. ATENA Program Documentation: Part 1 - Theory [online]. [cit. 2020-10-07]. Dostupné z: https://www.cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA_Theory.pdf.Asdd
- [5] IDEA StatiCa 10: Theoretical background for IDEA StatiCa Detail [online]. [cit. 2020-10-07]. Dostupné z: <https://www.ideastatica.com/cz/podpora/theoretical-background-for-idea-statica-detail>
- [6] COLLINS, Michael P. a Denis MITCHELL. Prestressed Concrete Structures. Ontario, Canada: Response Publications, 1997. ISBN 9780136916352.

ŠMYKOVÁ ODOLNOSŤ FRAGMENTU DOSKY V PRETLAČENÍ OVERENÁ EXPERIMENTÁLNYM TESTOM

PUNCHING SHEAR RESISTANCE OF A SLAB FRAGMENT VERIFIED BY EXPERIMENTAL TEST

Simona Šarvaicová^{*,1}

*simona.sarvaicova@stuba.sk

¹Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra betónových konštrukcií a mostov, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

Abstrakt

Tento článok sa zaoberá experimentálnym overením šmykovej odolnosti fragmentu dosky v pretlačení. Experimentálna vzorka hrúbky 0,2 m je podopretá výrazne obdĺžnikovým stĺpom s rozmermi priečného rezu $0,15 \times 0,9$ m, následkom čoho sa šmykové namáhanie koncentruje v oblasti rohov podpery. V dôsledku tohoto javu je potrebné dĺžku kontrolného obvodu redukovať. Na základe výsledkov získaných z experimentálneho testu a z nelineárnej analýzy v programe Atena, bola analyzovaná skutočná potreba redukcie dĺžky kontrolného obvodu s použitím vzťahu pre výpočet šmykovej odolnosti dosiek podľa Eurokódu 2. Následne bola taktiež overená spoľahlivosť vybraných návrhových modelov.

Keľúčové slova

Lokálne podopretá doska, experiment, nelineárna analýza, pretlačenie, šmyková odolnosť

Abstract

This paper deals with experimental verification of punching shear resistance of a slab fragment. An experimental specimen with thickness of 0.2 m is supported by a rectangular column with cross-sectional dimensions of 0.15×0.9 m, as a result of which the shear stress is concentrated in the area of the support corners. As a result of this phenomenon, it is necessary to reduce the length of the control perimeter. Based on the results obtained from the experimental test and from the nonlinear analysis in the Atena program, the real necessity to reduce the length of the control perimeter was analyzed using the Eurocode 2 shear resistance evaluation formula. Subsequently, the reliability of selected design models was verified.

Key words

Flat slab, experiment, non-linear analysis, punching, shear resistance

1 ÚVOD

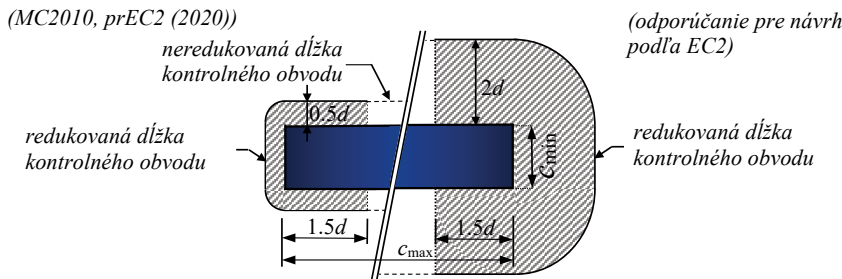
Lokálne podopreté (bezprievlakové) dosky patria k čoraz viac používaným typom stropných konštrukcií navrhovaných v praxi. Napriek tomuto faktu stále dochádza k prípadom náhleho kolapsu týchto konštrukcií. V okolí lokálnych podpier vzniká v stropnej doske dvojsmerné šmykové namáhanie, ktoré môže spôsobiť porušenie, tzv. pretlačenie. Ide o náhly typ porušenia konštrukcie, ktorý nie je vopred signalizovaný žiadnymi sprievodnými javmi ako napríklad nadmerný priehyb, či značnými trhlinami, a preto je nevyhnutné sa tomuto javu krehkého zlyhania bližšie venovať.

Tento článok sa zaoberá podrobnou analýzou fragmentu dosky podopretej vnútorným stĺpom s rozmermi 150×950 mm. V prípade stropných dosiek podopretých takto výrazne obdĺžnikovým stĺpom sa väčšina zaťaženia sústreďuje v oblasti rohov podpery, a preto je potrebné dĺžku kontrolného obvodu pri výpočte šmykovej odolnosti dosky redukovať. Redukcia podľa Model Code 2010 (MC2010) [1] spočíva v skrátení dĺžky kontrolného obvodu na vzdialenosť $1,5d$ od rohov podpery pozdĺž dlhšej strany stĺpa c_{max} (Obr. 1).

Predmetom tejto analýzy je porovnanie výsledkov získaných z experimentu s numericou nelineárnou analýzou a predikciami podľa vybraných návrhových modelov. Na základe porovnania šmykových odolností bola

overená spoľahlivosť jednotlivých modelov a taktiež spätné zistenie dĺžky reálneho kontrolného obvodu experimentálnej vzorky.

Podľa nelineárnej numerickej analýzy [2], sa redukcia dĺžky kontrolného obvodu nepreukázala ani v prípade výrazne obdĺžnikového stĺpa s pomerom strán priečného rezu $c_{\max} / c_{\min} = 7$. Experimentálny výskum slúži teda aj na priame overenie predbežných záverov tejto nelineárnej analýzy.



Obr. 1 Redukcia dĺžky kontrolného obvodu podľa návrhových modelov.

2 NÁVRH EXPERIMENTÁLNYCH VZORIEK

Skúšobná vzorka má štvorcový pôdorys s rozmermi $2,5 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$ a jej hrúbka je $0,2 \text{ m}$. Tieto rozmery vychádzajú z laboratórnych podmienok a z celkového usporiadania zostavy. Na zistenie materiálových vlastností boli v čase konania experimentu odobraté vzorky použitého betónu. Priemerná valcová pevnosť betónu dosiahla 29 MPa . Maximálne zmo použitého kameniva bolo $d_{g,\max} = 16 \text{ mm}$. Fragment dosky bol vystužený viazanou oceľovou výstužou triedy B500B s medzou klzu $f_{ym} = 550 \text{ MPa}$; $\text{Ø}16/100$ pri hornom povrchu a $\text{Ø}10/200$ pri dolnom povrchu. Krytie hornej hlavnej výstuže bolo $c_{\text{nom}} = 30 \text{ mm}$, pričom účinná výška dosky bola $d = 159 \text{ mm}$. Krytie dolnej výstuže bolo 20 mm . Vzorka nebola vystužená šmykovou výstužou.

Stĺp bol vyrobený z betónu triedy C45/55 a vystužený viazanou výstužou s priemerom prútov $\text{Ø} = 12 \text{ mm}$. Spolu bolo použitých 12 ks prútov zakotvených k hornému povrchu dosky a rozmiestnených rovnomerne po obvode stĺpa.

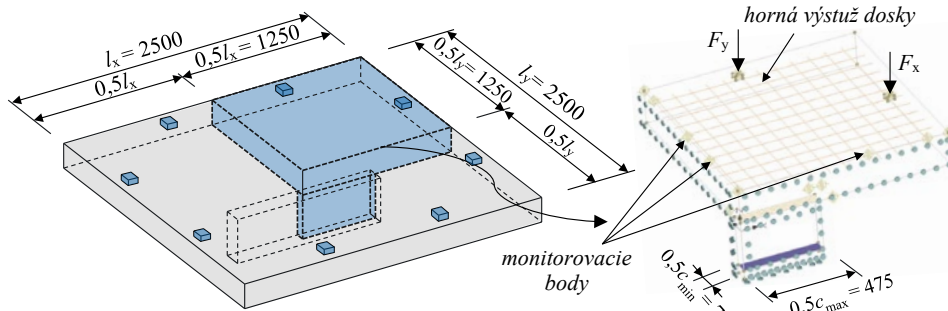


Obr. 2 Príprava experimentálnej vzorky: viazaná výstuž v debnení, vzorka tesne po zabetónovaní, odber materiálových vzoriek.

3 NELINEÁRNA ANALÝZA

Nelineárna analýza bola urobená vo výpočtovom programe Atena [5]. Kalibrácia modelov bola spravená na základe už realizovaných experimentov [6]. Nakoľko 3D nelineárne výpočty sú časovo náročné, využili sa podmienky symetrie a modelovaná bola len štvrtina z celkovej vzorky (Obr. 3).

Podľa výsledkov lineárnej analýzy dochádza k čiastočnému poklesu šmykových napätí vo vzdialenosti $1,5d$ od líca podpory [2]. Avšak, v nelineárnej analýze sa redukcia kontrolného obvodu nepreukázala aj napriek faktu, že pomer dlhšieho rozmeru stĺpa ku účinnej výške dosky bol $c_{\max} / d > 3$. Príčinou tohto javu je redistribúcia napätí okolo podpory.

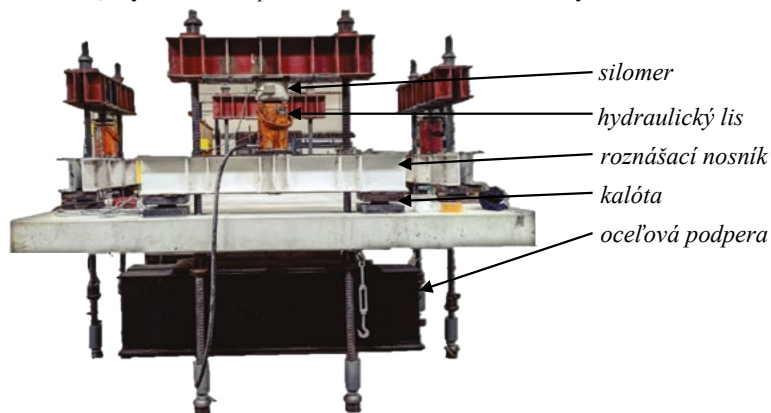


Obr. 3 Model fragmentu vzorky z programu Atena.

4 EXPERIMENTÁLNY PROGRAM

Zaťažovacia zostava

Zaťažovacia zostava pozostávala zo štvorice lisov umiestnených po obvode vzorky, ktoré boli rozopierané pomocou sústavy nosníkov. Tieto nosníky boli upevnené o ocelové tyče s priemerom $\varnothing = 42$ mm a kotvené do podlahy laboratória. Koncentrované zaťaženie sa z lisov prenášalo do spodnej roznášacej dvojice nosníkov, ktoré boli podložené kalótami, aby sa tak zabezpečilo kĺbové uloženie rámu a dosky.



Obr. 4 Návrh skúšobnej zostavy

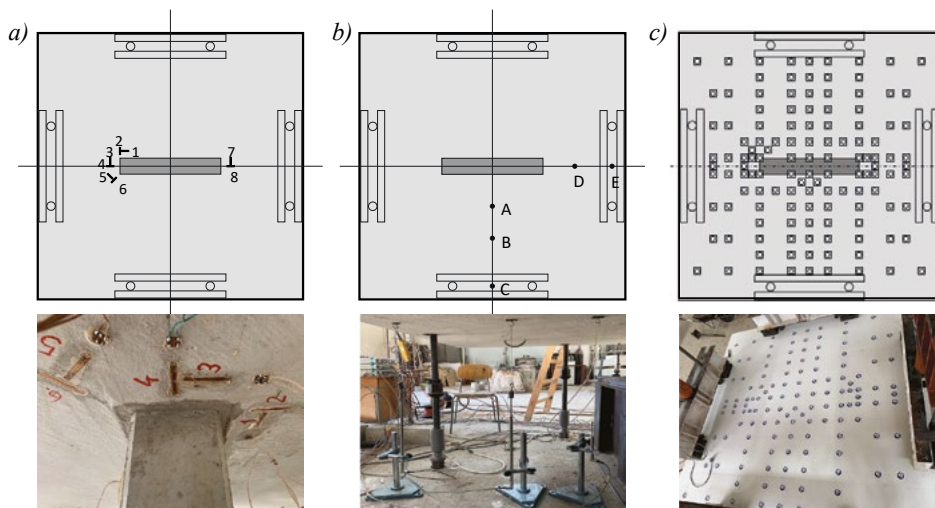
Postup zaťažovania vzorky

Zaťažovanie vzorky prebiehalo postupne v jednotlivých zaťažovacích krokoch po 50 kN (po 12,5 kN na jeden lis). Pred predpokladaným zlyhaním sa tento krok zmenšil na 25 kN. Medzi jednotlivými krokmi sa robili prestávky na ustálenie deformácií dosky, ktoré sa využili na zaznamenanie snímok pre fotogrametriu a zakreslenie novovzniknutých trhlín.

Meranie veličín

Veľkosť koncentrovaného zaťaženia v podobe ôsmich síl rozmiestnených po obvode dosky bola meraná pomocou štyroch silomerov zapojených na jednu hydraulickú sústavu. Zaťažovacia sila z jedného lisu bola do dosky vnášaná vždy v dvoch bodoch so vzájomnou vzdialenosťou približne 1 m (vzdialenosť ocelových kalôt).

Na vzorke boli taktiež nainštalované viaceré merače zaznamenávajúce jej deformačný stav počas celého priebehu zaťažovania. Na spodnom povrchu boli v okolí podpory nalepené tenzometre podľa schémy na Obr. 5a. Pomocou nich bolo možné určiť pomerné pretvorenia v radiálnom i tangenciálnom smere. Deformácie dosky boli merané v dvoch smeroch pomocou LVDT meračov umiestnených v líniiach osí dosky (Obr. 5b).



Obr. 5 Rozloženie snímačov a geodetických značiek.

V spolupráci s Katedrou geodézie SvF STU sa na experimentálnej skúške realizovala metóda merania pomocou konvergentnej fotogrametrie [7]. Táto metóda umožnila kontrolu meraní deformácií a meranie pomerných pretvorení na hornom povrchu dosky. Z fotografií bolo taktiež možné určiť vznik a rozvoj trhlin pri jednotlivých zaťažovacích krokoch. Princíp tejto metódy spočíva v selektívnom meraní polohy bodov signalizovaných kódovými značkami po každom zaťažovacom kroku (Obr. 5c).

5 DISKUSIA

V prvej fáze experimentov sa skúšala jedna pilotná vzorka, ktorá slúžila taktiež na odskúšanie experimentálnej zostavy. Ďalej sa pokračovalo so vzorkami podopretými stĺpmi s rôznym pomerom c_{\max} / c_{\min} . Táto analýza sa venuje výsledkom pilotnej vzorky. Skúšobná vzorka zlyhala pri celkovom zaťažení silou $V_{\text{test}} = 821$ kN. K tejto sile bola následne pripočítaná vlastná tiaž vzorky s hodnotou 31 kN. Zlyhanie malo krehký charakter porušenia, čo naznačovalo, že ku kolapsu vzorky prišlo následkom dosiahnutia šmykovej odolnosti. Experimentálne získaná hodnota šmykovej odolnosti bola porovnaná s návrhovými modelmi, čím sa overila ich spoľahlivosť (Tab. 1).

Tab. 1 Šmyková odolnosť experimentálnej vzorky.

	Základný kontrolný obvod [m]		Šmyková odolnosť [kN]			
	u_1	u_{red}	$V_{R,c}$	$V_{R,c,\text{red}}$	$V_{\text{test}} / V_{R,c}$	$V_{\text{test}} / V_{R,c,\text{red}}$
Test	4,07		852		-	-
Atena	4,09		825		1,03	1,03
EC2 [3]	4,20	3,25	847	656	1,01	1,30
prEC2 [4]	2,70	1,75	770	621	1,11	1,37
MC2010 [5]	2,70	1,75	779	606	1,09	1,41

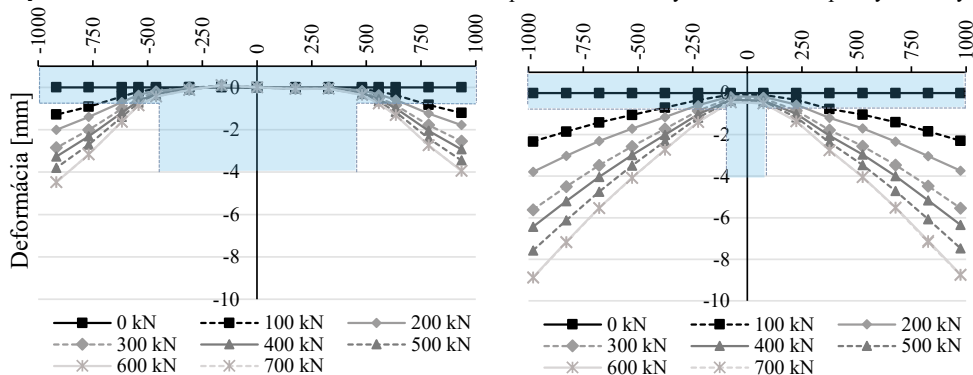
Na základe šmykovej odolnosti získanej z experimentu a z nelineárnej analýzy bola spätne odvodená dĺžka kontrolného obvodu s použitím vzťahu pre výpočet šmykovej odolnosti podľa EC2 [3].

Koncentráciu šmykových síl v okolí rohov podopretia možno potvrdiť vznikom prvých šmykových trhlin v tejto oblasti. Ako prvé vznikali radiálne trhliny, ktoré sa s narastajúcim zaťažením spájali novovzniknutými

tangenciálnymi trhlinami. Avšak porovnaním experimentálne získanej šmykovej odolnosti s hodnotami podľa návrhových modelov sa v prípade všetkých návrhových modelov nepreukázala potreba redukcie dĺžky kontrolného obvodu, nakoľko ich spoľahlivosť dosahuje 1,01 až 1,11 s uvážením plného kontrolného obvodu.

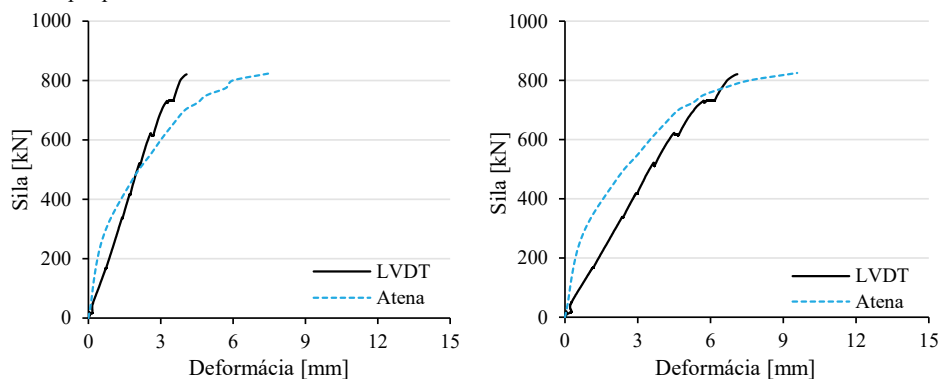
Deformácie

Priebeh deformácie vzorky v líniiach hlavných osí možno vidieť na Obr. 6. Podľa EC2 by stropná doska podopretá štvorcovým stĺpom mala rovnakú šmykovú odolnosť, ako doska podopretá stĺpom s obdĺžnikovým prierezom s rovnakou dĺžkou kontrolného obvodu. Návrhový model EC2 teda zohľadňuje len dĺžku kontrolného obvodu, nie geometriu podpery. Avšak porovnaním priebehov deformácií dosky možno potvrdiť vplyv geometrie stĺpa na jej šmykovú odolnosť. V smere kolmom na dlhší rozmer stĺpa emax došlo k výrazne väčšiemu priehybu dosky.



Obr. 6 Deformácia dosky v smere osi x a y (výsledky z fotogrametrického merania).

Meranie deformácií pomocou LVDT snímačov bolo porovnané s výsledkami nelineárneho výpočtu (Atena). Na Obr. 7 možno vidieť nárast deformácie v čase v bodoch D a E (podľa schémy na Obr. 5b). Počas zaťažovania došlo k celkovému nakloneniu vzorky v smere osi y, no výsledky fotogrametrického merania boli od celkového pootočenia poopravené.

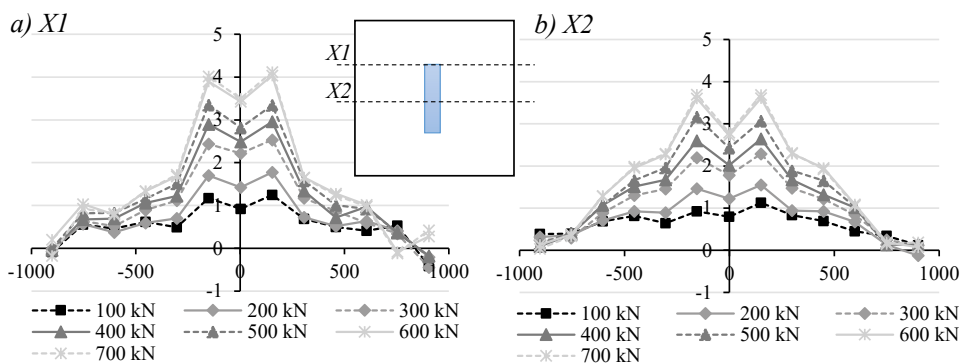


Obr. 7 Deformácia dosky v smere osi x (body D a E).

Pomerné pretvorenia

Pomerné pretvorenia na hornom povrchu dosky boli vyhodnotené na základe výsledkov fotogrametrického merania. Maximálne pomerné pretvorenia dosiahli hodnotu až 4,1 %. Na hornom povrchu dosky neboli pozorované výrazné rozdiely v pomerných pretvoreniach v reze vedenom stredom dlhšej strany stĺpa v porovnaní s oblasťou jeho rohov.

Pomerné pretvorenia boli merané i na spodnom povrchu vzorky v oblasti okolo podpory pomocou tenzometrov lepených v radiálnom i tangenciálnom smere podľa schémy na Obr. 3a. Najväčšie pomerné pretvorenia boli namerané v tangenciálnom smere okolo rohov podpory (tenzometre č. 3 a 7), naopak pomerné pretvorenia v radiálnom smere dosiahli v týchto bodoch najnižšie hodnoty.



Obr. 8 Priebeh pomerných pretvorení na hornom povrchu dosky.

6 ZÁVER

Predmetom tohto článku bolo oboznámiť s výsledkami zaťažovacej skúšky fragmentu stropnej dosky podpretej výrazne obdĺžnikovým stĺpom, ktorého výsledky boli konfrontované s numericou nelineárnou analýzou a predikciami podľa vybraných návrhových modelov. Na základe týchto porovnaní sa dospelo k týmto záverom:

Zaťažovacou skúškou ani nelineárnou analýzou sa nepreukázala potreba redukcie dĺžky kontrolného obvodu v porovnaní s návrhovými modelmi EC2, prEC2 (2020) a MC2010, ktorých spoľahlivosť dosahuje 1,01 až 1,11 pri uvážení plnej dĺžky kontrolného obvodu pre danú geometriu podpory a rovnomerné zaťaženie po obvode dosky.

Vznik prvých trhlin v radiálnom smere bol zaznamenaný okolo rohov podpory, čím sa preukázala koncentrácia napätí v týchto oblastiach.

Najväčšie pomerné pretvorenia na spodnom povrchu dosky boli namerané v tangenciálnom smere v bodoch blízko rohov podpory, čím sa opäť preukázalo, že zaťaženie prichádzajúce do podpory sa sústreďuje v jej rohoch.

PodĎakovanie

Tento výskum bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-15-0658 a za podpory výskumného projektu VEGA č.1/0254/19 „Šmyková odolnosť železobetónových dosiek namáhaných koncentrovaným zaťažením“.

Použitá zdroje

- [1] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETÓN, ed., 2012. Model Code 2010 - Final draft. Vol. 2. Lausanne, Switzerland: Ernst, 370 s. ISBN 978-2-88394-106-9.
- [2] ŠARVAICOVÁ, Simona, Viktor BORZOVIČ a Tomáš AUGUSTÍN, 2019. The influence of a column shape cross-section on the punching capacity. In: MBMST Procedia Engineering. Vilnius, Litva: Vilnius Gediminas Technical University, s. 455-462. ISBN 978-609-476-197-3. ISSN 2029-9915. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.3846/mbmst_2019
- [3] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2. London: British Standards Institution, 225 s. ISBN 978-0-58045-191-1.
- [4] Pracovný súbor prEN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Review 11. Upgraded draft D5, 2020.
- [5] ČERVENKA, Vladimír, Libor JENDELE a Jan ČERVENKA, 2020. ATENA Program Documentation, Part 1, Theory. Prague: Červenka Consulting, 340 s.
- [6] AUGUSTÍN, Tomáš, Eudovít FILLO a Jaroslav HALVONIK. Punching resistance of slab-column connections with openings. Structural Concrete. Lausanne, 2019, 2019(21), 278-290. ISSN 1751-7648.
- [7] FRAŠTIA, Marek, Marián MARČIŠ, Marek BAJTALA a Ondrej TRHAN, 2016. Measurement of building components deformations by the methods of digital photogrammetry. In: SGEM 2016 conference proceedings.. Sofia: STEF 92 Technology, s. 955-962. ISBN 978-619-7105-59-9.

MECHANICKÉ VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH KOMPOZITNÝCH KONŠTRUKCIÍ

MECHANICAL PROPERTIES OF SANDWICH COMPOSITE STRUCTURES

Pavína Zlámalová^{*1}, Marie Lipoldová¹

^{*}zlamalova.p@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

Článek uvádza prvé výsledky stanovenia mechanických vlastností kompozitných sendvičov a to pevnosť v tlaku, ťahu a chovanie v ohybe. Kompozitné sendviče budú použité ako hlavná nosná časť konštrukcie a to konkrétne v mostnej lávke pre peších. Z tohoto dôvodu bolo nutné zistiť ich mechanické vlastnosti najprv pre každú vrstvu sendviča samostatne, potom pre celý sendvič ako celok a následne podrobiť sendvičové panely degradačným skúškam. Výsledky získané z experimentov budú použité pre upresnenie výpočtového modelu mostnej lávky pre peších v MKP programe.

Klíčová slova

Sendvičové panely, mechanické vlastnosti, lávka pre peších, kompozit, numerický model

Abstract

The article presents the first results of determining the mechanical properties of composite sandwiches, namely compressive strength, tensile strength and flexural behavior. Composite sandwiches will be used as the main load-bearing part of the structure, specifically in the footbridge. Precisely because of this use, it was necessary to determine their mechanical properties first for each layer of the sandwich separately, then for the whole sandwich as a whole and then subject the sandwich panels to degradation tests. The results obtained from the experiments will be used to refine the computational model of the footbridge in the FEM program.

Key words

Sandwich panel, mechanical properties, footbridge, composite, FEM model

1 ÚVOD

Cieľom tejto práce je stanovenie mechanických vlastností na kompozitnom sendvičovom prvku pre lepšie pochopenie jeho vlastností a správania sa v konštrukcií. Konštrukcia, pre ktorú bude daný sendvičový systém využívaný, je spomínaná lávka pre peších. Pri návrhu lávky bol kladený dôraz na to, aby bola tvorená zo segmentov a vznikol tak modulárny systém. V prvom rade boli vyskúšané jednotlivé materiály samostatne a následne bol vyskúšaný menší segment sendvičovej konštrukcie. Vzhľadom na to, že sa bude jednať o lávku, ktorá sa nachádza vo vysoko exponovanom prostredí a bude musieť odolávať poveternostným vplyvom, mrazu a chemickým vplyvom, sa menšie sendvičové segmenty súběžne skúšajú aj na degradačné vplyvy (soľný roztok, zmrazovacie a rozmrazovacie cykly).

Sendvič je zložený z povrchovej vrstvy tvorenej zo sklenených vlákien hrúbky 1 mm (z oboch strán jadra) a jadrom tvoreného kompozitných roštom PREFAGRID 44 × 44/50 hrúbky 50 mm a svetlou vzdialenosťou ôk 44 mm pričom hrúbka jedného rebra je 6 mm. Zo získaných experimentálnych poznatkov bol vytvorený model lávky pre peších v MKP programe pre získanie predbežných predpokladov chovania lávky.



Obr. 1 Kompozitný rošt tvorený jadro sendviča a poťahy z sklenených vlákien.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Sendvičové štruktúry sú špeciálnym druhom vrstvených kompozitných konštrukcií zložených z kombinácie odlišných materiálov, ktoré sú navzájom spojené tak, aby uplatnili výhody vlastností jednotlivých zložiek. Sendvič sa skladá z dvoch tenkých veľmi pevných a tuhých vonkajších vrstiev spojených s ľahkým priestorovým jadrom, ktoré má výraznú hrúbku oproti vonkajším poťahom. Základným znakom sendvičových štruktúr je prenos ťahového a tlakového zaťaženia poťahmi a šmykového zaťaženia, ktoré vzniká medzi poťahmi, prenáša jadro. Porušenie sendvičových štruktúr nastáva vo vonkajšej vrstve alebo v jadre.

Z historického hľadiska sa sendvičové konštrukcie používajú už od 1. svetovej vojny, kde boli aplikované v leteckom priemysle. Následne od roku 1940–1960 začali prvé vývojové práce na zníženie hmotnosti sendvičového laminátu - vývoj voštinových a penových panelov. Za posledných dvadsať rokov sa kladie dôraz na optimalizáciu laminátov pomocou MKP používaných ako nástroj pre návrh a analýzu panelov. Výskumná a experimentálna časť sa v posledných rokoch venuje hlavne odolnosti proti nárazu, únavy materiálu, a lomovej mechanike pre aplikácie v leteckom a vesmírnom priemysle, v ktorých sú sendvičové panely najviac používané. V roku 1997 bola publikovaná odborná literatúra zaoberajúca sa kompozitnými sendvičovými panelmi, ktorá detailne popisuje ich chovania z hľadiska analýzy materiálov, mechanického správania materiálov a popisu možnosti realizácie experimentov [1].

V stavebníctve sa využívajú sendviče najmä ako nenosné konštrukcie a to napríklad ako dekoratívne panely v interiéroch, obklady stien, reklamné pútače, veľtržné stánky, izolačné, protipožiarne a nárazu vzdorné steny, výplň zábradlí a balkónov. Aj napriek výhodným vlastnostiam kompozitného sendviču nenašiel doposiaľ v stavebníctve ako nosná konštrukcia príliš veľké využitie. Vo veľkej miere sa naďalej využívajú obľúbené materiály ako betón, oceľ, drevo atď. Významne sa na tom podieľa hlavne fakt, že kompozitné sendvičové konštrukcie sú v stavebníctve ako nosná konštrukcia relatívne nový materiál a doposiaľ nebolo vykonaných dost' výskumných a experimentálnych prác aby vzbudili v navrhovaní dôveru.

Navzdory tomu môžeme nájsť využitie v stavebníctve a to napríklad v mostných konštrukciách konkrétne lávkach pre peších. Tieto konštrukcie bývajú odolné, pevné, ľahko sa inštalujú, udržiavajú a taktiež bývajú esteticky zaujímavé. V roku 2016 sa začali v Poľsku zaoberať kompozitnými sendvičovými lávkami s penovým jadrom [2], ktorá má obdobnú konštrukciu ako látka z kompozitného roštového sendviču popisovaná v tomto článku. Odborné články [3], [4], ktoré sa zaoberali najmä dynamickou analýzou, optimalizáciou a statickou analýzou menšieho segmentu mostnej konštrukcie, slúžili pre relevantnejšie porovnanie výsledkov z experimentov a numerickej analýzy konštrukcie lávky, ktorému sa venuje tento článok.

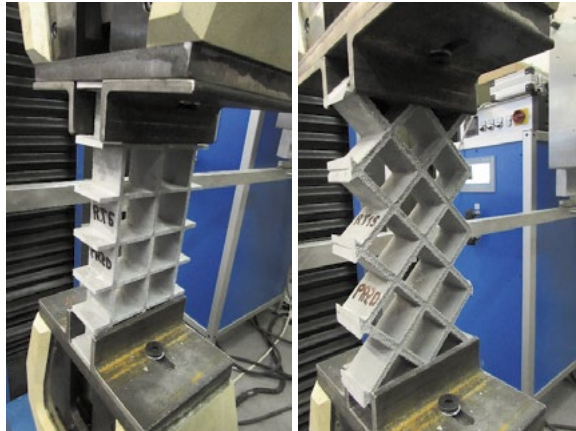
3 METODIKA

K správne mu pochopeniu chovania sendviču ako celku bolo najprv nutné vyhotoviť a vyhodnotiť experimenty na jednotlivých materiáloch, z ktorých je sendvič zložený. Povrchy sendviča (poťahy) o hrúbke 1 mm sú vyhotovené zo sklenených vlákien a jadro sendviča je zložené z kompozitných roštov PREFAGRID 44 × 44/50, ktorých hrúbka je 50 mm, vzdialenosť ôk je 44 mm a hrúbka jedného rebra je 6 mm. Pričom konfigurácia skúšok oboch materiálov bola dvojaká a to vlákna respektíve oká pod uhlom 0° a vlákna respektíve oká pod uhlom 45° aby sa zistili vlastnosti v rôznych smeroch pre budúce použitie do numerickeho MKP modelu. Pre presnejšie ťahové

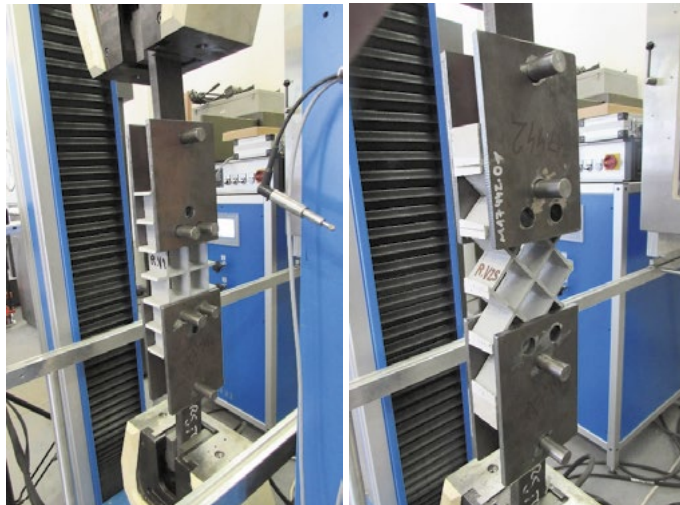
materiálové charakteristiky roštu sa vyhotovila skúška iba 1 rebra roštu s použitím tenzometrov. Z každej sady sa skúšalo vždy minimálne 6 kusov vzoriek.

Zoznam jednotlivých vyhotovených statických skúšok:

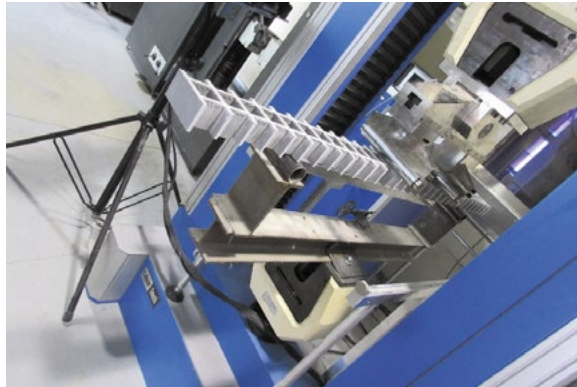
- Tlaková skúška roštov - oká roštov pod uhlom 0° (Obr. 2.)
- Tlaková skúška roštov - oká roštov pod uhlom 45° (Obr. 2.)
- Ťahová skúška roštov - oká roštov pod uhlom 0° (Obr. 3.)
- Ťahová skúška roštov - oká roštov pod uhlom 45° (Obr. 3.)
- Ťahová skúška laminátu - smer vlákien 0° (Obr. 5. vpravo)
- Ťahová skúška laminátu - smer vlákien 45° (Obr. 3. vpravo)
- Ťahová skúška 1 rebra roštu (Obr. 3. vľavo)
- 4-bodový ohyb roštu (Obr. 4.)
- 4-bodový ohyb sendviča (Obr. 6.)



Obr. 2 Zostava na tlakovú skúšku roštov (0° a 45° natočenie roštov).



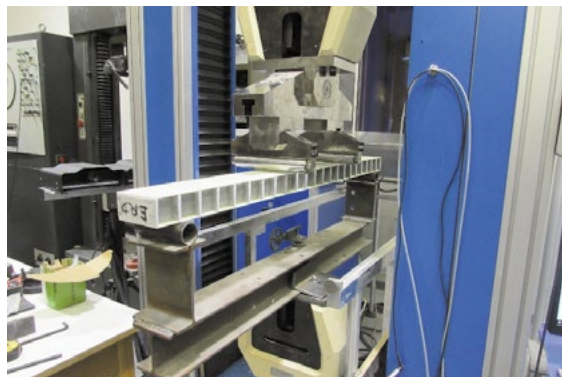
Obr. 3 Zostava na ťahovú skúšku roštov (0° a 45° natočenie roštov).



Obr. 4 Skúška 4-bodového ohybu roštu.



Obr. 5 Naľavo - ťahová skúška 1 rebra roštu; napravo - ťahová skúška laminátu.



Obr. 6 Skúška 4-bodový ohyb celého sendviča.

Rozmery prvkov pre tlakovú a ťahovú skúšku na Obr. 2. a Obr. 3. sú $306 \times 150 \times 50$ mm. Pri tlakovej skúške boli kvôli lepšiemu roznosu zaťaženia pri 3 kusoch vyplnené krajné oká živicom a pri ťahovej skúške boli v oblasti čapu osadené do oka roznášacie oceľové štvorčeky. Rozmery pri skúške 4-bodového ohybu roštu na Obr. 4. sú

1106 × 100 × 50 mm a rozteč medzi zaťažovacími bodmi je 300 mm. Rozmery na Obr. 6. sú totožné aj pri skúške 4-bodového ohybu celého sendviču.

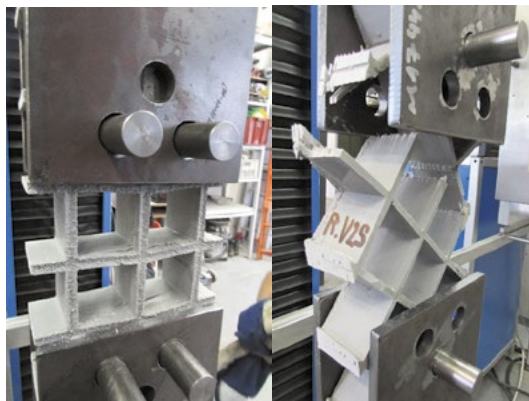
V nadväznosti na statické skúšky celého sendviča budú zahájené degradačné skúšky na rozmerovo tých istých vzorkách a po skončení degradačných skúšok budú jednotlivé vzorky odskúšané na 4-bodový ohyb pre porovnanie a vyhodnotenie zmeny mechanických vlastností a únosnosti sendviča. Degradačné skúšky sú plánované následne – v prvej fáze sa vzorky ponoria na mesiac do vody pričom jedna vzorka bude referenčná, ktorá bude iba ponorená do vody. V druhej fáze sa budú vzorky (okrem referenčného) skúšať na zmrazovacie a rozmrazovacie cykly súčasne s CHRL (odolnosť proti chloridom) v počte cyklov 100, 150 a 200. Pri vyhodnocovaní sa bude klásť dôraz na rozdiel medzi vplyvom vody a vplyvom rozmrazovacích a zmrazovacích cyklov.

4 VÝSLEDKY

Takmer všetky vzorky sa v rámci rôznych konfigurácií skúšok chovali rovnako. Vzorky skúšané na tlak na Obr. 7. sa porušovali na spoji vodorovného a zvislého rebra vybočovaním rebier v rovine namáhania a po odťažení sa vrátili do pôvodného tvaru. Vzorky skúšané na ťah na Obr. 8. sa porušovali tak isto na spoji vodorovného a zvislého rebra, v niektorých prípadoch dochádzalo k utrhnutiu v tomto spojení. Vzorky roštov na Obr. 9. skúšané na 4-bodový ohyb sa porušovali v ťahanej spodnej časti delamináciou vrstiev pričom vzorky celého sendviča sa správali pri skúšaní obdobne.



Obr. 7 Vzorky vyskúšané na tlak.

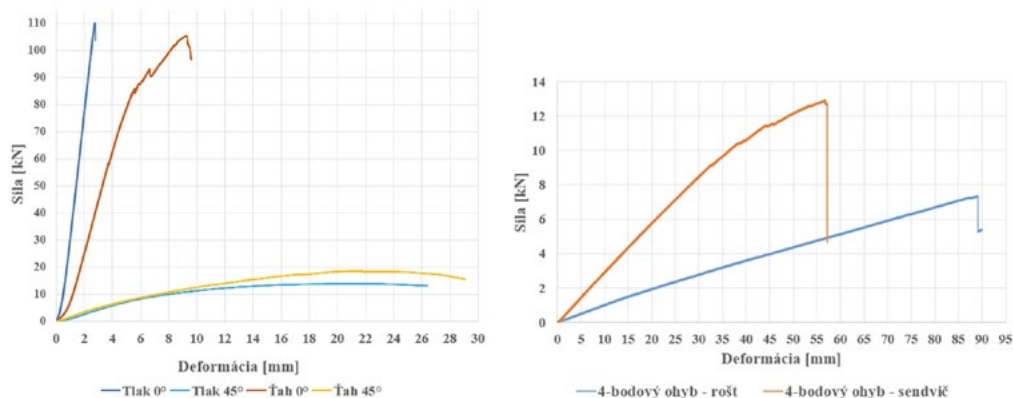


Obr. 8 Vzorky vyskúšané na ťah.



Obr. 9 Vzorky skúšané na 4-bodový ohyb.

V nasledujúcich grafoch sú zhrnuté výsledky reprezentačných vzoriek jednotlivých experimentov. Na Obr. 10. je naľavo graf obsahujúci výsledky z tlakových a ťahových skúšok pre názornú ukážku rozdielov medzi vzorkami s rebami, ktoré majú 0° uhol a 45° uhol odklonu rebierok. Tlaková a ťahová únosnosť pre rošt s 0° otočenými rebierkami (rebrá rovnobežne so smerom zaťaženia) dosahuje približne rovnakých hodnôt a to 110 kN. To isté môžeme povedať aj o vzorkách roštov, ktoré sú otočené o 45° pričom dosahujú tlakovej a ťahovej únosnosti približne 15 kN. Napravo sa nachádza graf, ktorý zobrazuje skúšku na 4-bodový ohyb pre rošt a sendvič, kde rošt dosahuje únosnosti približne 7 kN a sendvič 13 kN. Všetky výsledky experimentov sú zhrnuté v Tab.1, ktoré sú spriemerované pre každú skúšku zo sady 6 kusov.



Obr. 10 Naľavo - graf s porovnaním výsledkov tlakových a ťahových skúšok; Napravo - graf s porovnaním výsledkov 4-bodového ohybu roštu a sendviča.

Tab.1 Zhrnutie výsledkov experimentov.

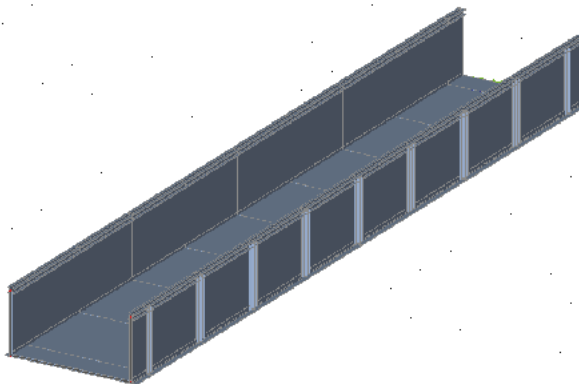
	Maximálna sila [kN]	Max. defor. [mm]	Max. napätie [MPa]	Modul pružnosti [GPa]
Ťah 0°	97,83	8,15	118,58	7,07
Ťah 45°	17,91	21,54	21,08	0,65
Tlak 0°	109,14	3,90	132,29	15,98
Tlak 45°	12,25	28,43	14,42	0,50
Ťah 1-rebro	73,88	16,04	246,26	11,54
Ťah tkanina 0°	10,72	3,87	207,94	6,09
Ťah tkanina 45°	5,69	2,74	94,96	4,50
4-bodový ohyb rošt	7,92	94,65		
4-bodový ohyb sendvič	12,91	60,51		

5 DISKUZE

Z grafov na Obr. 10. je možné vidieť, že vzorky roštov s otočením rebierok o 0° uhol (rebrá rovnobežne so smerom zaťaženia) dosahujú vyšších hodnôt únosnosti a zároveň menších deformácií ako vzorky roštov, ktoré sú otočené o 45° . Rozdiel medzi dosahovanými silami je viditeľný z Tab.1 a to v tlaku približne o 88% a v ťahu 83%. Viditeľný rozdiel je aj na fotkách z experimentov na Obr. 7. a Obr. 8. , kde je viditeľne väčšie porušenie pri vzorkách otočených o 45° . Pri skúške 4-bodového ohybu sa taktiež ukázala vyššia únosnosť a menšia deformácia pre celý sendvič ako samostatný rošt a zároveň je viditeľné, že samotný laminát nemá na únosnosť veľký vplyv.

6 ZÁVĚR

Z predstavených experimentov boli zistené základné mechanicko-fyzikálne parametre, ktoré budú ďalej využité pri príprave nadväzujúcich experimentov, pre porovnanie degradačných vplyvov a všeobecne budú využívané v ďalších numerických štúdiách. S ohľadom na predpokladané využitie týchto kompozitných sendvičov budú zistené charakteristiky následne použité napríklad pre upresnenie výpočtového modelu pripravovanej kompozitnej lávky na Obr. 11.



Obr. 11 Numerický model kompozitnej lávky.

Poděkování

Článek bol riešený v rámci projektu FV40278 Odolné sendvičové nosné prvky z progresívnych kompozitných FRP materiálov a FAST-S-20-6502 Rozšíření aplikačních oblastí nekovových FRP výztuží v odolných betonových konstrukcích.

Použité zdroje

- [1] ZENKERT, D. The Handbook of Sandwich Construction [online]. 1997 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1366187/FULLTEXT01.pdf>
- [2] PYRZOWSKI, Ł., MISKIEWICZ, M., Modern GFRP Composite Footbridges, 10th International Conference Environmental Engineering, 2017. DOI: 10.3846/enviro.2017.143, ISBN:978-609-476-044-0
- [3] CHROSCIELEWSKI, J., FERENC, T., MIKULSKI, T., MISKIEWICZ, M., PYRZOWSKI, Ł., Numerical modeling and experimental validation of full-scale segment to support design of novel GFRP footbridge, Composite Structures, 2019, 213, 299-307. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.01.089
- [4] FERENC, T., MIKULSKI, T., Parametric optimization of sandwich composite footbridge with U-shaped cross-section, Composite Structures, 2020, 246. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112406

TAHOVÁ PEVNOST KOMPOZITNÍ VÝZTUŽE V MÍSTĚ OHYBU

TENSILE STRENGTH OF BENDED COMPOSITE REINFORCEMENT

Juraj Lagin^{*,1}

^{*}email: lagin.j@fce.vutbr.cz

¹adresa: Ústav betonových a zděných konstrukcí, FAST VUT v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Kompozitní výztuž je ve své podstatě prvek s vysokou kapacitou tahové pevnosti. Pevnost výztuže zabezpečují hlavně vnitřní skelná vlákna, která sjednocuje a zároveň chrání epoxidová (termosetová) matrice. Společně tak tvoří tzv. skelná kompozitní výztuž (GFRP).

Vzhledem k přednosti vláken přenášet zejména tahová napětí, nemá výztuž stejné vlastnosti ve všech směrech. V případě změny směru namáhání nebo ohnutí vláken tak dochází k změně rozložení a působení napětí a dochází k redukci tahové pevnosti ohýbaného prutu.

Cílem článku je zjistit a popsat faktory, které redukci tahové pevnosti způsobují a zjistit vhodné zkušební metody. Ty otestovat a určit vhodnou metodu pro provádění dílčích experimentálních zkoušek v rámci dílčích etap projektu FW01010520.

Klíčová slova

Tahová pevnost, ohyb, termoset, GFRP, kompozitní výztuž

Abstract

The composite reinforcement is a material with a high tensile strength capacity. Strength of reinforcement is mainly provided by inner glass fibers, which are unified and protected by an epoxy (thermoset) matrix. So, name of the reinforcement is glass fiber composite polymer (GFRP).

Due to the priority of the fibers to transmit especially the tensile stress, reinforcement does not have the same characteristics in all directions. Change the direction of the fibres causes that, distribution and the way of stresses changes and the tensile strength of the bent rod is reduced.

The aim of the article is to describe the factors, that cause the reduction of tensile strength, to identify appropriate testing methods, examine methods and to choose one method for testing in the next phases of the project FW01010520.

Key words

Tensile strength, bend, thermoset, GFRP, composite reinforcement

1 ÚVOD

Rozdílné složení a způsob výroby kompozitní výztuže vede v porovnání s betonářskou výztuží k odlišným materiálovým charakteristikám a chování výztuže. Řešené ohýbání prutů kompozitní výztuže způsobuje redukci tahové pevnosti často až na úroveň 50 %. Cílem práce je proto zjištění příčin a veličin ovlivňující redukci tahové pevnosti a možné modifikace výroby tak, aby byla redukce tahové pevnosti v co nejnižší úrovni.

Na závěr byly zrealizovány experimentální zkoušky ohýbané kompozitní výztuže se skelnými vlákny vyráběné v České republice firmou Prefa Kompozity Brno. Cílem bylo zjištění tahové pevnosti výztuže v místě ohybu, ale také zabezpečení referenčních vzorků pro další výzkum projektu FW01010520.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

V současnosti není pro Českou republiku dle platných norem jasně definován vztah pro návrh ohýbané výztuže z kompozitních materiálů. V případě návrhu je proto nutno použití postupů uvedených v normách a směrnících zahraničních států, jako například japonská JSCE [1], americká ACI 440.3R-04 [2], kanadská CSA S806-12 [3], nebo FIB Bulletin no.40 [4].

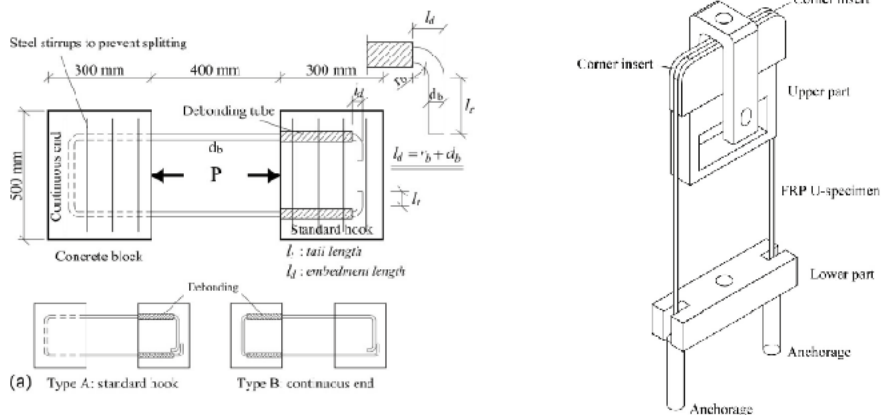
FIB Bulletin [4] uvádí, že na základě předešlých studií by se měla redukce tahové pevnosti uvažovat na úrovni 40 % až 50 %. Toto tvrzení bylo testováno a následně byl v JSCE [1] zaveden vztah, na základě kterého je hodnotu tahové pevnosti ohybu možné dopočítat:

$$f_{fb} = \left(0,05 \frac{R}{d_b} + 0,3\right) f_{fu} \leq f_{fu} \quad (1)$$

kde R je poloměr zakřivení, d_b průměr prutu a f_{fu} mezní tahová pevnost přímé části prutu. Konstanta 0,05 představuje pravděpodobnost odchylky. Tuto hodnotu je možno navýšit až na 0,092, což však sebou nese vysoké riziko. Pro výsledný vztah byla proto konzervativně zvolena hodnota 0,05.

Testovací metody

Pro testování ohýbaných kompozitních prutů existuje několik normovaných sestav, z nichž jako nejpoužívanější lze uvést zkoušky B.5 a B.12, podrobně popsané v ACI 440.3R-04 [2].



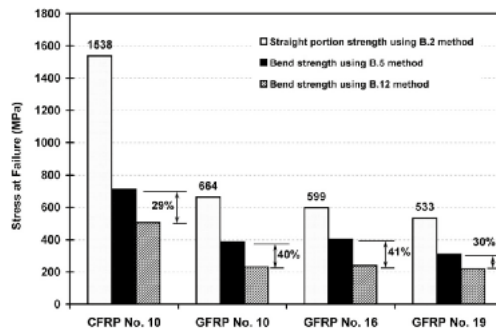
Obr. 1 Experimentální zkouška B.5 (vlevo) a B.12 (vpravo) [2].

Podstatou zkoušky B.12 je uchycení vzorku výztuže ve tvaru U do ocelové části odpovídajícího tvaru. Ve spodní části prutu jsou umístěny koncovky, skrze které je do výztuže vnášeno tahové napětí.

Zkouška B.5 se skládá z dvou betonových bloků, do kterých je výztuž umístěna. Betonové bloky jsou od sebe vzájemně odtlačovány pomocí hydraulického zařízení, v důsledku čeho ve výztuži vzniká tahové napětí. Jeden z bloků (v našem případě levá strana) slouží výhradně pro zatížení prvku. Do druhého bloku je umístěna testovaná část výztuže. Jelikož cílem je zjistit tahovou pevnost v místě ohybu, přímá část prutu se od okolní vrstvy betonu separuje. V případě, že by separace nebyla provedena, výztuž by přenášela napětí do betonového bloku i v přímé části a výsledky zkoušek by byly značně nadhodnoceny.

Porovnáním těchto dvou metod se zabírala studie [5]. Jejím cílem bylo zjistit výhody a nevýhody jednotlivých testovacích metod a vhodnost použití při testování jednotlivých typů výztuže. Pro oba testy byly vždy použity pruty stejného průměru a poloměru zakřivení, a to na úrovni čtyř násobku průměru výztuže. Dále jsou uvedeny výsledky v grafickém zobrazení, kde C označuje uhlíkovou výztuž (carbon) a G výztuž s nosnými sklenými vlákny (glass). Číslo v názvu označuje průměr použité výztuže.

Grafické zobrazení výsledku je vyobrazeno na Obr. 2.

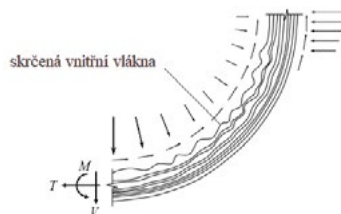


Obr. 2 Výsledky testů studie [5].

Ve výsledku bylo zjištěno, že zkouška B.12 v porovnání s metodou B.5 výsledky podhodnocuje. Tento fakt je způsoben tím, že výztuž bez okolní povrchové vrstvy betonu nedokáže přenášet napětí po délce ohybu. Síly, resp. napětí, se tedy koncentrují na počátku ohybu, kde také dochází k jeho porušení.

Je proto možné konstatovat, že skutečné podmínky chování kompozitní výztuže pro vyztužování betonových prvků lépe simuluje metoda B.5. Bylo také potvrzeno, že v porovnání s původními tvrzeními, která odhadovala pevnost ohybu na úrovni 40-50 %, může tahová pevnost ohybu dosáhnout vyššího poměru k tahové pevnosti přímé části a to na úrovni až 60 % a výš.

Závěrem bylo také konstatováno, že při ohýbání výztuže, jejíž složení sestává z vnitřních nosných vláken a okolní matrice, která jednotlivá vlákna spojuje do celistvé vrstvy, dochází ke krčení, resp. protažení krajních vláken. Termosetová matrice, která dosahuje své konečné vlastnosti relativně rychle po vytvrzení ve vysokoteplotní peci, nedovoluje vnitřním vláknům v místě ohybu volnou deformaci, resp. rozprostření neboli zplacatění průřezu. To má za následek, že na vnitřní straně ohybu dochází ke krčení a naopak na vnější straně protažení nosných vláken, v důsledku čeho jsou vnější vlákna namáhána ještě před samotným zatížením výztuže, čím není využito potenciálu vnitřních vláken.



Obr. 3 Změna rozložení nosných vláken podél ohybu [5].

Vliv změny průřezu

Vzhledem ke skutečnosti, že redukce tahové pevnosti ohybu do značné míry závisí na vhodně zvolené geometrii, bylo dále zjišťováno, do jaké míry se lze úpravou geometrie průřezu přiblížit k tahové pevnosti přímé části prutu. Tímto faktorem se zabírala studie [6]. Byly zkoumány uhlíkové pruty obdélníkového a pro porovnání také kruhového průřezu. Aby tyto dva typy prutů bylo možné srovnávat, je nutno zvolit parametr, na úrovni kterého budou průřezy a pruty porovnávány. Jako porovnávací parametr byl zvolen poměrný rádius. Pro kruhový průřez ve vztahu (1) platí, že poměrný rádius je roven poměru poloměru (R) zakřivení a průměru prutu (d). Aby bylo hodnoty možno srovnávat při dodržení stejného poloměru zakřivení a zároveň ploše průřezu, je nutno dopočítat ekvivalentní průměr obdélníkového prutu:

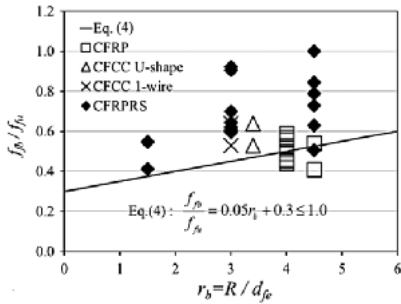
$$d_{fe} = 2 \sqrt{\frac{w_f \cdot t_f}{\pi}} \quad (2)$$

kde w_f je šířka a t_f tloušťka průřezu.

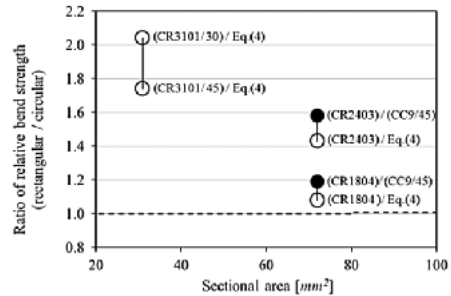
Zvolením různých hodnot šířky a tloušťky je možné určit rozměry průřezu, a to při dodržení stejného jak poměrného rádiusa, tak i plochy průřezu. Dle teorie by však se snižující tloušťkou mělo docházet také ke snižování redukce tahové pevnosti ohybu, a to v důsledku menšího počtu předem namáhaných vnějších, resp. nevyužitých vnitřních vláken.

Zároveň byl předmětem zkoumání vztah (1) dle JSCE. Jak již datum vydání normy (1997) napovídá, vztah může být zastaralý a v určitých ohledech nemusí odpovídat současným trendům a zvolenému (obdélníkovému) průřezu. Ve studii [6] byly pomocí metody B.5 experimentálně testovány výztuže obdélníkového průřezu s rozličnými poměry tloušťky k šířce a zvoleným poměrným rádiusem. Plocha průřezu byla vždy odpovídající a jednotná.

Grafické zobrazení výsledků je na Obr. 4 a Obr. 5.



Obr. 4 Porovnání výsledku dle typu průřezu [6].



Obr. 5 Poměr výsledku obdélníkové průřezu ke kruhovému, resp. K pevnosti dle vztahu (1) [6].

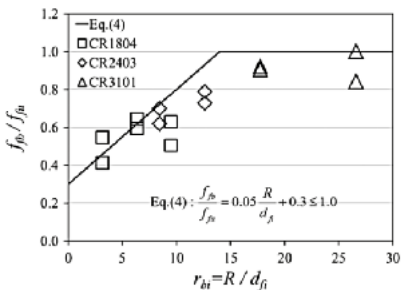
Ve výsledku (Obr. 4) bylo zjištěno, že pruty obdélníkového průřezu (značeny CFRPRS) vykazují v porovnání s kruhovými (značeny CFRP) nižší redukci tahové pevnosti v místě ohybu. Sice je složení výztuže od projektem řešené (GFRP) výztuže odlišné, bylo však prokázáno, že změnou průřezu lze redukci tahové pevnosti snížit. Další typy výztuže v grafu jsou zakázkově vyráběny typy, které nejsou předmětem řešení. Křivka zaznačená do grafu odpovídá teoretické pevnosti dle vztahu (1). Hlavním důvodem vyšších pevností obdélníkové výztuže je výše popsána redukce množství krajních vláken.

Další krokem bylo ověření vztahu (1) pro obdélníkové průřez. Jak je z Obr. 4 patrné, pro určení tahové pevnosti ohybu kruhových prutů je vztah poměrně dobře nastaven. Výsledky zaznačené na Obr. 4 a Obr. 5 však ukazují, že pro obdélníkový průřez je tento vztah poměrně konzervativní a je možná jeho modifikace. Na Obr. 5 značení CRXXYY označuje XX šířku a YY tloušťku obdélníkového prutu. CC značí kruhovou výztuž odpovídajícího ekvivalentního průměru a plochy průřezu. Eq. (4) je označení vztahu (1). Obr. 5 tedy zobrazuje poměr zkušenného vzorku a vztahu (1).

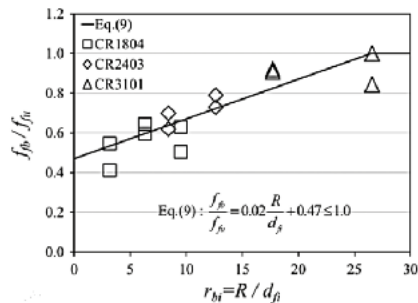
Vzhledem k výsledkům byla navržena úprava vztahu (1) pro obdélníkové pruty:

$$\frac{f_{fb}}{f_{fu}} = \left(0,02 \frac{R}{d_{fi}} + 0,47 \right) \tag{3}$$

Obr. 7 a Obr. 8 zobrazují porovnání výsledků s použitím vztahů (1) a (3). Jak je z Obr. 7 patrné, vztah (3) lépe odpovídá dosaženým výsledkům výztuže obdélníkových průřezů.



Obr. 6 Výsledky s použitím vztahu (1) [6].



Obr. 7 Výsledky s použitím vztahu (3) [6].

3 METODIKA

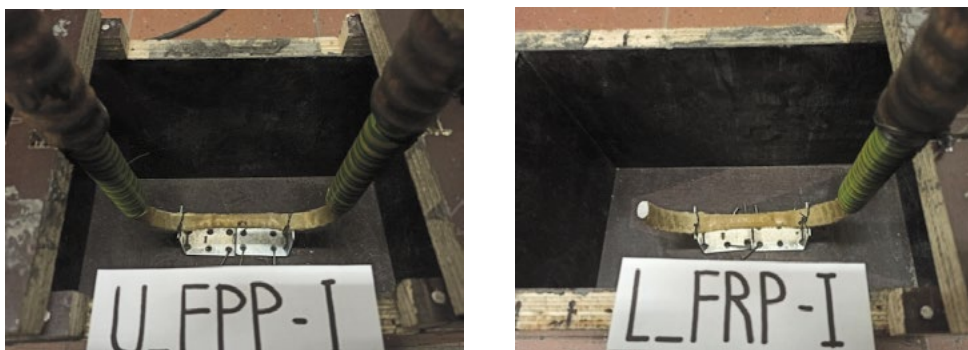
Na základě předešlých zjištění byla pro testování projektem řešených vzorků zvolena metoda B.5. Poloměr zakřivení byl zvolen 50 mm, čemu při zvoleném průměru výztuže 10 mm odpovídá poměrný rádius 5,0.

Vzhledem k dostupným zkušebním zařízením laboratoře výzkumného centra AdMas však bylo nutno schéma zatěžování upravit. Část betonového bloku, která u zkoušky měla sloužit jako zatěžovací část, byla odstraněna. V místě testovaného ohybu byla sestava ponechána. Betonový blok byl pomocí ocelového profilu a závitových tyčí uchycen k podlaze. Výztuž ve tvaru U, byl v horní části opatřena koncovkami, skrze které bylo pomocí hydraulického válce do výztuže vnášeno tahové napětí. Toto provedení zkoušky (Obr. 9) sebou však nese vysoké riziko nepřesností, jako například odchylky geometrie způsobené při betonáži a natočení a nerovnoměrné zatěžování jedné z větví trmínku. V konečném důsledku tedy u toho typu testu vždy dochází k selhání ve slabší ze dvojice větví výztuže. Bylo proto navrženo další zatěžovací schéma pozůstávající z výztuže ve tvaru L, která měla eliminovat zejména nepřesnosti a křivost při zatěžování.

Bohužel, u první sady testovacích vzorků, která se skládala z pěti prvků typu U a pěti prvků typu L, byla dodána výztuž s tak vysokou tahovou pevností, že vysoce překračovala předpokládané hodnoty. Důsledkem bylo, že při experimentech nedocházelo k porušení v požadované části, ale selhání kotvení v koncovkách.

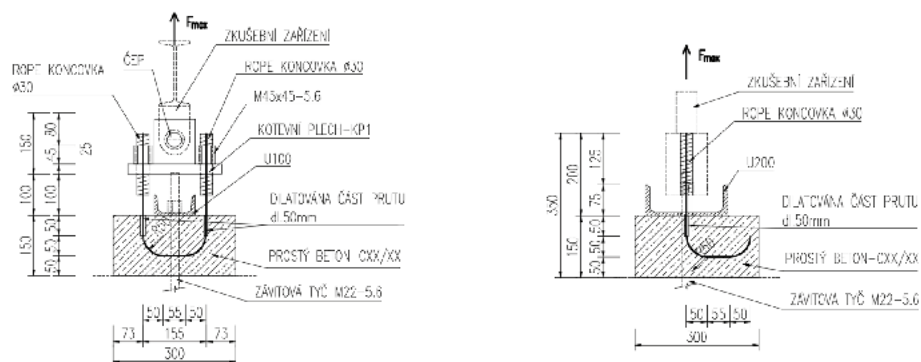
Následně byla proto upravena kotvící délka a experimenty byly provedeny na nových prvcích. Jelikož součástí projektu je zkoušení vlivu různých typů prostředí na tahovou pevnost výztuže, byly téměř všechny zbývající výztuže uloženy do van, které simulují určité prostředí. Z důvodu malého počtu dostupných vzorků proto plyne i nízký počet zkoušených prvků.

Na Obr. 8 je vyobrazena výroba bednění testovaných prvků.



Obr. 8 Výroba prvku typu U (vlevo) a L (vpravo).

Schématy typů zatěžovacích zkoušek jsou na Obr. 9.



Obr. 9 Schéma zkoušky typu U (vlevo) a L (vpravo).

4 VÝSLEDKY

Výsledky experimentů typu L a U jsou shrnuty do výsledné tabulky 1:

Tab. 1 Přehled výsledků zkoušek typu U a L.

Ozn.	Průměr (mm)	Rádus (-)	Max. síla (kN)	Mez. napětí přímých prutů (MPa)	Mez. napětí ohybů (MPa)	Podíl (%)
U_FRP-I	10		96,02		611,28	44,69
U_FRP-II	10	5,0	94,12	1367,74	599,18	43,81
L_FRP-I	10		57,95		737,84	53,95
L_FRP-II	10		64,44		820,48	59,99

5 DISKUZE

Ve výsledku bylo zjištěno, že při stejném poměrném rádiu, dosahují prvky typu L až 60 %, zatím co prvky typu U 44 %. Rozdílné hodnoty testů je možno přisoudit zvolenému postupu výpočtu. Výsledná tahová pevnost pro typ U je vypočtena jako maximální síla podělena plochou dvou větví výztuže. Tento přístup však nemusí odpovídat realitě. Nepřesnosti geometrie zatěžovacího konstrukce a samotného vzorku mohou způsobovat nerovnoměrné zatěžování větví výztuže, v důsledku čeho není přerozdělení síly na úrovni 50/50. V konečném důsledku tak dochází k přebírání vyššího zatížení jednou větví, která následně také dříve selhává.

6 ZÁVĚR

Bylo prokázáno a zjištěno, že:

- vzhledem k jednoznačnějším výsledkům bez zjišťování poměru přebírání síly, lepší proveditelnosti zkoušky a efektivity experimentu, bude pro další experimenty využita zkouška typu L,
- tahovou pevnost ohybu výztuže s kvalitou provedení dodané k datu zahájení projektu lze pro poměrný rádus o hodnotě 5,0 uvažovat na úrovni min. 50 % z tahové pevnosti přímé části kompozitní výztuže.

Další etapy projektu se budou zabývat zkoušením a prokazováním vlivu poloměru zakřivení, typem geometrie průřezu a vlivem složení výztuže, zejména její matrice.

Poděkování

Výzkum byl zpracován na základě projektu FW01010520 – Vývoj ohýbané kompozitní výztuže pro environmentálně exponované betonové konstrukce.

Použité zdroje

- [1] JSCE: Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials. 1997 ed. Japan: Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers; 1997.
- [2] ACI 440.3R-04: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures. . Farmington Hills: American Concrete Institute; 2004.
- [3] CAN/CSA-S806-12: Design and Construction of Building Structures with Fibre-reinforced Polymers. . Rexdale, Ont., Canada: Canadian Standards Association; 2012.
- [4] FIB Bulletin no.40: FRP reinforcement in RC structures. . Germany: The International Federation for Structural Concrete; 2007
- [5] Ahmed EA, El-Sayed AK, El-Salakawy E, Benmokrane B. Bend Strength of FRP Stirrups: Comparison and Evaluation of Testing Methods. Web of Science. 2015;9.
- [6] Lee C, Ko M, Lee Y. Bend Strength of Complete Closed-Type Carbon Fiber-Reinforced Polymer Stirrups with Rectangular Section. American Society of Civil Engineers. 2013;2013:11.

VERIFIKACE TEPLOTNÍHO PRŮBĚHU PO VÝŠCE ŠTÍHLÉ KONSTRUKCE V ČASE

VERIFICATION OF TEMPERATURE GRADIENT OF SLENDER STRUCTURE IN TIME

Marek Velešik^{*,1}, Michal Požár¹, Radim Nečas¹

*velesik.m@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí, Veverčí 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

Hlavním předmětem řešení článku je teplotní namáhání železobetonového předpjatého průřezu a jeho vliv na geometrické změny štíhlých mostních konstrukcí. Správné stanovení teploty po výšce průřezu hraje stěžejní roli pro dlouhodobé geodetické sledování, které prokazuje správnost výpočetních modelů mostních konstrukcí. Za účelem upřesnění prostupu tepla průřezem byl vytvořen a kontinuálně sledován zkušební vzorek s po výšce osazenými teplotními čidly. Naměřené hodnoty následně posloužili pro ověření analýzy prostupu tepla na objemovém výpočtovém modelu v prostředí programu Ansys Mechanical.

Klíčová slova

Prostup tepla, štíhlá konstrukce, teplotní gradient, Ansys Mechanical, teplotní senzory

Abstract

The main focus of this article is the temperature loading of prestressed reinforced concrete cross-section and its influence on geometrical changes of slender bridge structures. Correct determination of temperature along the height of the cross-section takes a key role for long-term geodetic monitoring, which may prove the correctness of computational models of bridge structures. In order to approximate heat transfer in cross-section, a test specimen with temperature sensors installed along the height was formed and continuously monitored. The measured values were subsequently used for verification of performed heat transfer analysis on volume computational model in the software Ansys Mechanical.

Key words

Heat transfer, slender structure, temperature gradient, Ansys Mechanical, temperature sensors

1 POPIS KONSTRUKCE A VYTYČENÍ CÍLE

Je známo, že teplotní namáhání staticky určitých konstrukcí jednoduchého uspořádání není pro návrh a posouzení mostní konstrukce klíčové. Naopak u architektonicky a konstrukčně složitějších konstrukcí statická neurčitost v kombinaci s neumožněním volné deformace od teplotního namáhání vliv průběhu teplot po výšce průřezu pro následnou analýzu zdůrazňuje. Zásadní vliv pak má teplotní namáhání u štíhlých předpjatých staticky neurčitých konstrukcí podporovaných lany, u kterých je nutná nelineární analýza s vlivem velkých deformací. Příkladem složité konstrukce náchylné na změny teplot je mostní konstrukce tvořená předpjatým pásem.

Prostorové uspořádání mostu odpovídá navrženému konstrukčnímu typu – visutému předpjatému pásu. Most je přímý a je v proměnném podélném sklonu. Proměnný podélný sklon se směrem ke středu mostu zmenšuje až do nulové hodnoty. Volná šířka mezi zábradlím je 3,00 m, šířka mostu je 3,80 m. Příčný sklon je podle PD střechovitý o velikosti 1 %. Nosnou konstrukcí mostu tvoří visutý předpjatý pás, který je vetknut do krajních monolitických opěr - Obr. 1. Visutý pás je tvořen z prefabrikovaných segmentů. Krajní segmenty jsou na opěrách uloženy na nevytužených elastomerových ložiskách. Protože ložiska nejsou s nosnou konstrukcí mostu spojena, mohla se nosná konstrukce při výstavbě při předpínání od ložisek odvinout a při zatížení znovu přivinout. Toto uspořádání zmenšuje místní namáhání koncových segmentů ve vetknutí. Proto tedy i rozpětí nosné konstrukce je proměnné od 57,73 m do 63,36 m. Délka visutého pásu je 63,36 m. Průvės visutého pásu je proměnný, závisí na teplotě a velikosti zatížení. Projektovaný průvės pásu při teplotě 10 °C bez proměnných zatížení byl 1,56 m. Při záporných teplotách se průvės pásu zmenšuje, naopak při vysokých kladných teplotách se průvės pásu zvětšuje.

Prefabrikované segmenty jsou 0,30 m vysoké, 3,80 m široké a 3,00 m dlouhé. Segmenty DS-Lv jsou oproti segmentům DS-L vylehčeny podlahou – kazetové vybrání spodního povrchu. Segmenty jsou nesené lanovými kabely „A“ 2×5×(3×2) lan Lp 15,5 mm a předepnuté kabely „B“ 14×(3×2) lan Lp 15,5 mm a kabely „C“ 4×2 lan Lp 15,5 mm [5].

Přímé oslunění a vysoké teploty v letních měsících, a naopak mrazy v zimě mění průvės popsáného pásu celkem až o 30 cm. Pro správnou analýzu a diagnostiku konstrukce je nutné k měření deformací a tím i určení posuzované geometrie správně určit teplotu konstrukce. Provedená geodetická sledování ukázala, že nestačí měřit teplotu vzduchu a teplotu horního a spodního povrchu konstrukce. Rozdíly mezi teplotou povrchu a vnitřkem betonových segmentů může být až 10 °C. Takto výrazný rozdíl ovlivní průvės pásu a znehodnotí porovnání geodetického měření s průhyby stanovenými statickou analýzou. Může pak dojít ke zkrácení závěrů a špatné interpretaci výsledků s důsledky pro majitele konstrukce. Špatná interpretace měření teplot vedoucí k naměření jiného průvèsu pásu může chybně znamenat změny v tuhosti konstrukce např. v důsledku poškození nosných předpínacích lan.



Obr. 1 Lávka tvořená předpjatým pásem v Kroměříži.

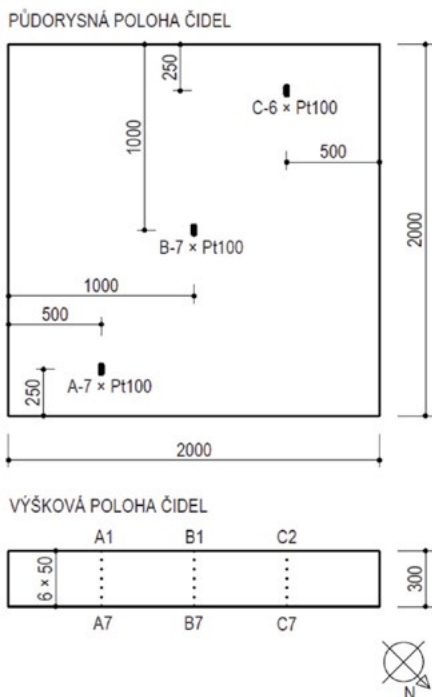
2 NAVRHOVANÝ EXPERIMENT A MĚŘÍCÍ TECHNIKA

Experimentální model je tvořen železobetonovým blokem o rozměrech 2,00 × 2,00 × 0,30 m, je osazen na ocelových podpěrách ve výšce 1 m nad terénem a je umístěn v exteriéru v otevřeném prostoru v polygonu centra AdMaS. Na modelu jsou měřené teploty po výšce průřezu ve třech pozicích – A, B a C - Obr. 2, dále teplota vzduchu nad a pod středem panelu a oslunění panelu. Na pozici A a B je po výšce 7 teplotních čidel, na pozici C jich je 6 z důvodu omezeného počtu kanálů měřící ústředny. S ohledem na velikost vzorku a oslunění lze předpokládat stejnou teplotu na celém horním povrchu, tudíž nemusí být teplotní snímač na všech pozicích. Teplotní snímače Pt100 osazené na horním a dolním povrchu prvku jsou zabetonovány tak, aby lícovali s povrchem s rozdílem úrovně do 1 mm. Lze tedy uvažovat, že teplota na snímačích odpovídá povrchové teplotě prvku. Vnitřní teplotní snímače Pt100 jsou osazené v přesné pozici dle Obr. 2 po výšce s roztečí 50 mm. Teplotní snímače vzduchu jsou osazené těsně nad a pod povrchem prvku. Naměřená data sbírá měřící ústředna dataTaker DT80G s expanzním modulem CEM20. Oslunění prvku je měřeno snímačem osvětlení osazeným uprostřed prvku na horním povrchu.

Popis měřící sestavy

- Teplotní snímač Pt100 od výrobce Sensit, typ TG68-60 je odporový snímač konstruován pro měření teploty plyných a kapalných látek. Teplotní rozsah použití snímače je od -40 do +105 °C. Snímač vyhovuje stupni ochrany IP 68 (1 bar) podle ČSN EN 60529 a je konstruován pro měření teploty pod hladinou a pro trvalé ponoření až do hloubky 5 m. Snímač tedy zvládne bez poškození i betonáž. Průměr nerezové jímky je 6 mm a délka nerezové části je 60 mm. Snímač je čtyřvodičový. Celá sada teplotních snímačů je výběrová – snímače mají stejné dlouhodobé chování.

- Světelný snímač neboli senzor osvětlení s měřicím převodníkem 0-10 V. Rozsah měření je od 0 do 100000 Luxů, typ senzoru – fotodioda, spektrální citlivost 600 nm. Teplotní rozsah použití snímače je od -20 do +75 °C.
- Datalogger DataTaker DT80G je speciální vícekanálový měřicí systém s univerzálními vstupy. Je schopný dlouhodobého autonomního provozu s možností připojení nejrůznějších snímačů.
- Expanzní modul CEM20 je rozšíření počtu vstupních kanálů pro loggery dataTaker řady DT8X. Každý modul CEM20 je vybavený dvaceti vstupy.

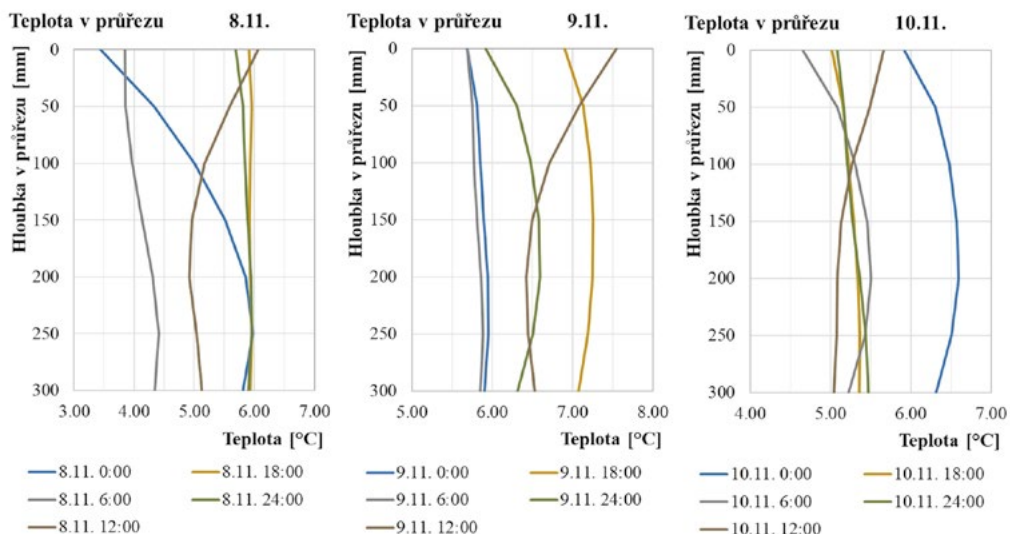


Obr. 2 Přehledné schéma a fotografie zkušebního vzorku.

3 PRVNÍ NAMĚŘENÁ DATA

V následujících grafech je znázorněn průběh teploty po výšce průřezu zkušebního vzorku. Z výstupů je patrné, že teplota nemá po výšce lineární průběh, zejména pak v časech, kdy je povrch osluněn. Lze vidět, že lineárnímu průběhu se křivky teplot nejvíce blíží v nočních hodinách v čase 24:00, což vzhledem k datu měření odpovídá přibližně středu časového intervalu mezi západem a východem slunce. Nejvíce blízkou křivku lineárnímu průběhu lze sledovat v grafu pro den 10.11.2020 v čase 24:00 - Obr. 3, kdy bylo převážnou část dne zataženo a nedošlo tedy k oslunění povrchu vzorku ani k velkému rozdílu teplot. Naopak v grafu pro den 9.11.2020, lze vidět, že křivky teplot po výšce průřezu není zdaleka lineární ani v čase 24:00, protože měření probíhalo ve slunečný den, a došlo tedy ke znatelnějšímu teplotnímu rozdílu v průběhu dne na horním povrchu zkušebního vzorku.

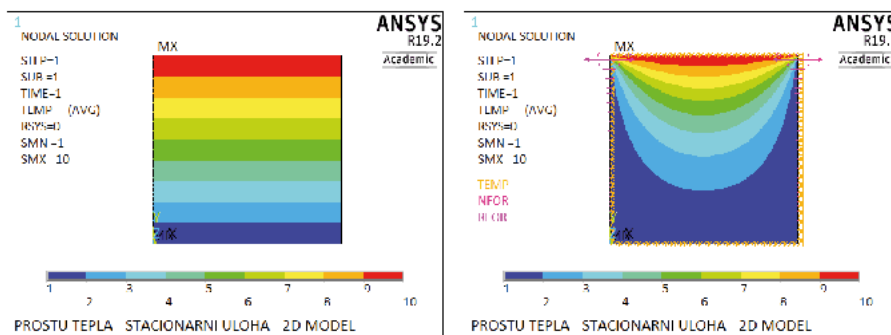
Měření proběhlo v měsíci listopadu, kdy nedochází k výrazným teplotním výkyvům v průběhu dne a intenzita solárního záření je nižší než v letních měsících. Proto naměřené hodnoty nemusí znázorňovat tak radikální rozdíly ve vývoji teplot na osluněném povrchu a uvnitř průřezu. Výhledově je plánováno provést měření i v jarních a letních měsících, kdy díky intenzivnějšímu solárnímu záření budou získána další klíčová data. Přesto je z grafů nelineární průběh teplot patrný. Nelineární průběh teploty po výšce průřezu není novým poznatkem a vyplývá z prostupu tepla vzorkem. Ten závisí na okolních vlivech jako je sluneční svit či způsob a rychlost proudění okolního média. Prozatím problematika nelineárního průběhu teplotního zatížení nebyla aplikována na líniové štíhle konstrukce, jako jsou především lávky tvořené předpjatým pásem či jiným konstrukčním systémem s malou výškou průřezu. Teplotu pro analýzu globálních účinků zatížení teplotou na konstrukci lze získat integrováním naměřeného průběhu teplot po výšce průřezu.



Obr. 3 Grafy průběhu teplot po výšce průřezu v měřených časech.

4 ANALÝZA POMOCÍ SOFTWARE

Naměřené hodnoty z experimentu následně sloužily k ověření vytvořených výpočtových modelů v prostředí softwaru Ansys Mechanical 19.2. Srovnání výstupu z výpočtových modelů a hodnot naměřených na zkušebním vzorku přispělo k nalezení vhodného přístupu modelování časově závislé analýzy prostupu tepla. Při hledání vhodného způsobu modelování byl nejdříve vytvořen model zkušebního tělesa se zjednodušením na dvoudimenzionální úlohu. Prvek byl zatížen teplotním zatížením ve formě definování teploty na vnějších uzlech. Prvotní výpočty byly prováděny na prvku Plane55, který je definován čtyřmi uzly, kdy v každém z nich je jeden stupeň volnosti, a to teplota. Tento prvek je vhodný pro řešení stacionární dvou dimenzionální úlohy teplotního zatížení. Rozhodující materiálovou vlastností pro takto definovanou úlohu je tepelná vodivost λ , která byla pro tento případ (železobeton) uvažována charakteristickou hodnotou $\lambda = 1,48 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ dle normy ČSN 73 0540-3 přílohy A [3]. Tato hodnota by měla být zpřesněna s ohledem na stupeň vyztužení a objemovou tíhu betonu, ale pro názornost prvotního příkladu je tato hodnota dostačující. Dále bylo definováno teplotní zatížení teplotou horního povrchu $10 \text{ }^\circ\text{C}$ a teplotou spodního povrchu $1 \text{ }^\circ\text{C}$, dle předpokladu byl výsledkem analýzy lineární průběh teploty po výšce prvku dle Obr. 4 vlevo. Při definici teplotního zatížení na horní povrch $10 \text{ }^\circ\text{C}$ a na zbylé povrchy $1 \text{ }^\circ\text{C}$, dochází k prostupu tepla prvkem dle Obr. 4 vpravo.



Obr. 4 Výstup ze softwaru Ansys – stacionární úloha prostupu tepla dvou dimenzionálním prvkem.

Z předchozího výpočtu a pochopení základních zákonitostí prostupu tepla je patrné, že pro správné stanovení teploty po výšce průřezu bude nutné provést časově závislou analýzu s definováním okrajových podmínek v čase.

Popis výpočtového modelu pro časově závislou analýzu prostupu tepla

Geometrie výpočtového modelu byla definována tak, aby odpovídala skutečné geometrii zkušebního vzorku, tedy půdorysné rozměry jsou $2,00 \times 2,00$ m a výška je 0,30 m. Pro definování prostorové úlohy byl použit 8 uzlový prvek Solid 70 určený jak pro řešení stacionárních teplotních úloh, tak pro úlohy, kdy se okrajové podmínky v čase mění. V každém z osmi uzlů je opět jeden stupeň volnosti a to teplota. Prvek je nadělen po délce a šířce na dílky po 0,10 m a po výšce na dílky po 0,05 m, kvůli zpřesnění výsledků (toto rozdělení elementů po výšce odpovídá také výškové poloze snímačů kvůli vyhodnocení výsledků).

Materiálové vlastnosti byly zadány tak, aby co nejlépe vystihovaly pozorovaný vzorek z betonu C30/37 a současně splňovaly parametry definované dle Eurokódu.

Tab. 1 Přehled materiálových charakteristik zadaných ve výpočtovém modelu.

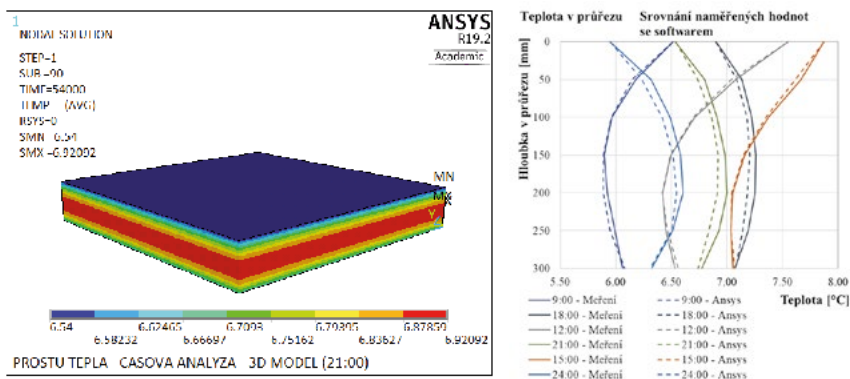
Materiálová charakteristika	Modul pružnosti	Poissonovo číslo (Minor)	Součinitel teplotní roztažnosti	Hustota	Součinitel tepelné vodivosti	Měrná tepelná kapacita
Značka jednotky	E_{cm} [GPa]	ν [-]	α [-]	ρ [kg/m ³]	λ [W / m · K]	c [J/kg · K]
Hodnota	33	0.20	0.00001	2500	2.7	870

Vzhledem k tomu, že nejsou přesnější informace o modulu pružnosti prvku, hustotě a součiniteli teplotní roztažnosti, jsou tyto hodnoty uvažovány pro železobetonový prvek z betonu C30/37 dle hodnot uvedených v ČSN EN 1992-1-1 ed.2 [4]. Dle EC 2 [4] lze uvažovat hodnotu poissonova součinitele pro beton neporušený trhlinami hodnotou 0,2. Součinitel tepelné vodivosti je pro tuto úlohu zpřesněn a vypočítán s ohledem na objemovou tíhu a přítomnost betonářské výztuže dle vztahu: $k_p = 0,0013 \cdot \rho - 0,5502$ dle [1]. Lze sledovat jeho značné navýšení dle hodnoty definované v normě [3]. Měrná tepelná kapacita lze uvažovat pro beton přibližně hodnotou 880 J / kg · K. [5] a pro ocel (betonářskou výztuž) přibližně hodnotou 480 J / kg · K [5]. S ohledem na množství betonářské výztuže ve zkušebním tělese bude uvažováno s hodnotou $c = 870$ J / kg · K.

Na takto zadaném objemovém prvku byly následně na horním a dolním povrchu definovány okrajové podmínky ve formě časově proměnných teplot dle měření na povrchu zkušebního vzorku (čidla B1 a B7) ze dne 9. 11. Analýza sledovala vývoj teplot od 6:00 do 24:00.

5 PRVNÍ VÝSLEDKY Z NUMERICKÉHO MODELU

Z výsledků si lze vytvořit závěr, že tímto jednoduchým způsobem modelování lze velmi dobře aproximovat průběh teplot po výšce průřezu. K tomuto přístupu modelování je navíc třeba znát pouze teplotu na povrchu sledované konstrukce a základní parametry o materiálu. Na grafu - Obr. 5 lze vidět velmi dobrou shodu mezi naměřenými daty na zkušebním vzorku (plná křivka) a hodnotami získanými ze softwaru (čárkovaná křivka).



Obr. 5 Pohled na výsledky na objemovém modelu a graf srovnání experimentu s výpočtovým modelem.

Je nutné ovšem poukázat na mírné odchylky ve vnitřní části vzorku, které ovšem v průběhu času nepřesahují hodnotu $[0,1]$ °C. Z důvodu měření teploty přímo na povrchu vzorku, nikoliv teploty okolního prostředí, je postihnout i vliv slunečního záření. Tato odchylka je tedy patrně způsobena prouděním vzduchu, které v modelu není zohledněno. Vliv tohoto jevu by šel v softwaru zadat pomocí v čase proměnného součinitele prostupu tepla K [$W / m^2 \cdot K$]. Pro jeho správné definování by bylo třeba měřit rychlost větru a vlhkost v závislosti čase. Tento parametr dále závisí na typu proudění média, geometrii, povrchu a rozdílu teplot mezi okolním prostředím a sledovaným tělesem [2], proto by se analýza stala výrazně obtížnější.

6 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

Prostřednictvím časově závislé analýzy prostupu tepla je možné zjistit průběh teploty po výšce průřezu. Kladně lze hodnotit, že k přiměřeně přesnému zhodnocení teploty po výšce průřezu prostřednictvím analýzy prostupu tepla stačí znát v čase teploty na povrchu konstrukce a základní materiálové parametry konstrukce. Takto je stanovena teplota v průřezu bez zásahu do existující konstrukce. Realizovaným experimentem byla dokázána dostatečná přesnost výsledků z numerického modelu. Pro konstrukčně složitější a štíhlé konstrukce lze tímto způsobem lépe vystihnout teplotní zatížení a předejít tak špatné interpretaci výsledků při porovnávání geodeticky naměřených průhybů s průhyby stanovenými výpočetními modely.

Poděkování

Článek vznikl za podpory projektu FAST-S-20-6409 - Verifikace teplotního průběhu po výšce segmentu štíhlé předpjaté konstrukce s důsledky pro dlouhodobé sledování – identifikační číslo 6409.

Použité zdroje

- [1] ASADI, Iman, Payam SHAFIGH, Zahiruddin Fitri Bin ABU HASSAN a Norhayati Binti MAHYUDDIN. Thermal conductivity of concrete – A review. *Journal of Building Engineering* [online]. 2018, 20, 81-93 [cit. 2020-11-19]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobe.2018.07.002
- [2] GUO, Lixia, Lei GUO, Ling ZHONG a Yueming ZHU. Thermal conductivity and heat transfer coefficient of concrete. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed* [online]. 2011, 26(4), 791-796 [cit. 2020-11-19]. ISSN 1000-2413. Dostupné z: doi:10.1007/s11595-011-0312-3
- [3] KEIM, Lubomír. Tepelná ochrana budov - Část 3: Návrhové hodnoty veličin: ČSN 73 0540-3. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [4] ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 (731201) Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, Praha, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019
- [5] Specific heat capacity, 2014 [online]. United Kingdom: © Designing Buildings Ltd., [cit. 13.12.2020] Dostupné z: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Specific_heat_capacity

EXPERIMENTÁLNE STANOVENIE SÍL V ZÁVESOCH LÁVKY PRE PEŠÍCH

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF CABLE FORCE OF A PEDESTRIAN BRIDGE

Kristína Bezručová*¹

*bezrucova.k@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí, Veverí 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

Článek načrtáva problematiku experimentálneho stanovenia sily v závesoch na lávke pre peších s využitím závislosti medzi vlastnou frekvenciou predpätého tiahla a silou v ňou. Popísaný je všeobecný princíp a predpoklady výpočtu. Uvedené sú základné rovnice a výsledné vzťahy medzi silou a frekvenciou pre ideálnu strunu a nosník.

Poznatky sú následne aplikované na reálnej konštrukcii lávky pre peších v Ostrave, kde sú stanovené sily v závesoch.

Klíčová slova

Kmitanie strún, vlastné frekvencie, sila v závese, lávka pre peších

Abstract

Paper shortly refers about experimental determination of cable force of a pedestrian bridge through relations between natural frequency of prestressed cable and its level of prestress. General principles and assumptions are described. Basic equations and relations between force and frequency of ideal string and beam are mentioned. Methods are applied for determination of cable force of pedestrian bridge in Ostrava.

Key words

String oscilation, natural frequencies, cable force, pedestrian bridge

1 ÚVOD

Charakteristickou vlastnosťou zavesených lávok pre peších a mostov je, že rozdelenie síl v závesoch zásadne ovplyvňuje ich celkové pôsobenie a priebeh vnútorných síl. Znalosť napätia v predpätých závesoch tohoto typu konštrukcií je tak kľúčovou informáciou pre stanovenie stavu, v akom sa jestvujúca konštrukcia nachádza.

Jednou z možností stanovenie síl v predpätých lanách je metóda založená na modálnych parametroch lana [1]. Metóda vychádza zo vzťahu medzi vlastnou frekvenciou predopnutej struny a silou v nej. Diagnostika lán tak spočíva v ich vybudení, zaznamenaní odozvy a frekvenčnej analýze zaznamenaného signálu. Sila v lane je dopočítavaná zo stanovených vlastných frekvencií lana.

Táto metóda bola použitá pre stanovenie síl v závesoch na oblúkovej lávke pre peších cez ulicu Porážkovú, železničnú trať a ulicu Frýdlantskú v Ostrave.

2 KMITANIE PREDPÄTÝCH STRÚN A NOSNÍKOV

Meranie síl v predopnutých závesoch mostov a lávok pre peších, vychádza z teórie priečného kmitania strún [2]. Sila v závese sa nemeria priamo, ale pri známych geometrických a materiálových vlastnostiach závesov sa dopočítava z hodnôt vlastných frekvencií priečného kmitania závesu.

Pri idealizácii závesu pre stanovenie vzťahov medzi napätím (silou) v ňom a jeho vlastnými frekvenciami sa vychádza z pomeru medzi jeho ohybovou tuhosťou a dĺžkou. Rozlišuje sa model tzv. ideálnej struny - tiahlo bez ohybovej tuhosti a model kmitajúceho nosníka s nenulovou ohybovou tuhosťou. Tlmenie konštrukcie sa zohľadňuje v závislosti na jeho veľkosti - malé tlmenie je možné zanedbať.

Kmitanie strún

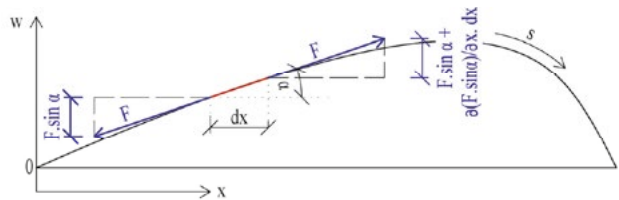
Kmitanie strún sa odvodzuje zo základnej pohybovej rovnice pri zavedení nasledujúcich predpokladov:

- struna je homogénna, dokonale ohybná ($EI=0$) a pružná. Hookov zákon platí' nemusí,
- struna má jednotkovú hmotnosť μ a dĺžku l ,
- priemer struny je malý v porovnaní s jej dĺžkou,
- krivka kmitania struny je plochá - priehyb struny je malý. Platí $dx \approx ds$ a $\sin \alpha \approx \alpha \approx \frac{\partial w}{\partial x}$,
- je možné zanedbať zmenu predpínacej sily F - predpínacia sila sa uvažuje konštantná,
- pohyb elementu struny v jej pozdĺžnom smere x je možné zanedbať.

Všeobecný tvar základnej pohybovej rovnice:

$$m \cdot a + c \cdot v + k \cdot u = f \quad (1)$$

kde m je hmotnosť, a zrýchlenie, c tlmenie, v rýchlosť, k tuhosť, u posun a f zaťaženie v danom bode.



Obr. 1 Element kmitajúcej struny - veličiny.

Pre element struny za použitia uvedených predpokladov prejde rovnica (1) pre netlmenú stranu do tvaru:

$$\mu dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \left(F \sin \alpha + \frac{\partial(F \sin \alpha)}{\partial x} dx \right) - F \sin \alpha \quad (2)$$

Po úpravách a využití predpokladov sa rieši pre netlmenú kmitajúcu strunu rovnica:

$$\mu \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = F \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (3)$$

Riešením sú vlastné tvary kmitania struny v tvare:

$$w_{0n}(x) = \text{konst.} \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{l}x\right) \quad (4)$$

Vzťah medzi predpínacou silou F a n -tou vlastnou frekvenciou sa odvodí zo vzťahu:

$$\omega_n = 2\pi f_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (5)$$

kde ω_n je uhlová kruhová frekvencia struny a f_n je netlmená vlastná frekvencia struny.

Predpínacia sila v netlmej strune je tak pri známej vlastnej frekvencii f_n rovná:

$$F = \frac{4f_n^2 \mu l^2}{n^2} \quad (6)$$

Pre tlmenú strunu sa zavádza tlmenie (odpor prostredia) ako viskózna sila závislá na rýchlosti výchylky a je daná súčinom súčiniteľa tlmenia δ_l vzťahnutého na jednotku dĺžky a rýchlosti výchylky.

Pre tlmenú strunu je tak rovnica (1) v tvare:

$$\mu \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = F \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \delta_l \frac{\partial w}{\partial t} \quad (7)$$

Riešením sa stanoví tvar kmitu tlmej struny, ktorý je identický s tvarom struny netlmej, vid' rovnica (4).

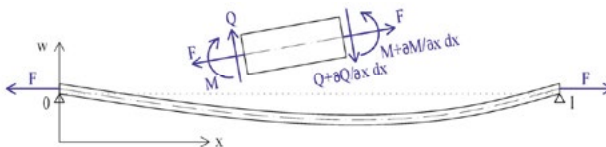
Vzťah medzi predpánacou silou a vlastnou tlmenu frekvenciou f_n sa stanovuje obdobne ako pre tlmenu strunu zo vzťahu (5). Pre predpánaciu silu F v tlmenej strune tak pri pomernom útlme ζ platí:

$$F = \frac{4f_n^2 \mu l^2}{n^2} \cdot \frac{1}{1 - \zeta^2} \quad (8)$$

Kmitanie nosníkov

Kmitanie nosníkov sa obdobne ako kmitanie strún odvodzuje zo základnej pohybovej rovnice (1) po zavedení niekoľkých predpokladov [3]:

- kmitá štíhly prizmatický nosník ($EI = \text{konšt.}$),
- nosník má prierezovú plochu A a hustotu ρ ,
- hlavné osi zotrvačnosti ležia v dvoch rovinách, nosník kmitá v jednej z týchto rovín,
- platí Bernoulli - Navierova hypotéza o rovinnosti prierezov,
- priehyb nosníka je malý v porovnaní s jeho priečnymi rozmermi,
- pohyb elementu struny v jej pozdĺžnom smere x a ich natočenie v rovine ohybu je možné zanedbať,
- pre nosník platí momentová rovnica rovnováhy pri zanedbaní rotačnej zotrvačnosti $\frac{\partial M}{\partial x} = Q$ a linearizovaný vzťah medzi ohybovým momentom a krivosťou $M = -EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$.



Obr. 2 Element kmitajúceho nosníka - veličiny.

Zostavená pohybová rovnica pre kmitajúci element netlmeneho nosníka má tvar:

$$\rho A dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial Q}{\partial x} dx + \frac{\partial}{\partial x} (F \sin \varphi) dx \quad (9)$$

Po úpravách a využití predpokladov sa rieši pre netlmene kmitajúci nosník rovnica:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -\frac{EI}{\rho A} \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{F}{\rho A} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (10)$$

Pre riešenie rovnice je nutné zaviesť okrajové podmienky vystihujúce uloženie nosníka v podporách. Charakteristicky sa rieši nosník kĺbovo uložený a votknutý. Nosník kĺbovo uložený má v mieste podpory nulový posun ($w_0(0) = w_0(l) = 0$) a nulový ohybový moment ($\frac{d^2 w_0(0)}{dx^2} = \frac{d^2 w_0(l)}{dx^2} = 0$). Nosník votknutý má v mieste podpory nulový posun ($w_0(0) = w_0(l) = 0$) a nulové pootočenie ($\frac{dw_0(0)}{dx} = \frac{dw_0(l)}{dx} = 0$).

Riešením rovníc za využitia okrajových podmienok sa stanoví vzťah medzi prepínacou silou a vlastnou netlmenu frekvenciou nosníka.

Pre netlmene kĺbovo uložený nosník platí:

$$F = \frac{4l^2 \rho A}{n^2} \cdot \left(f_n^2 - \frac{n^4 \pi^2 EI}{4l^4 \rho A} \right) \quad (11)$$

Pre netlmene votknutý nosník platí:

$$F = \frac{(\sqrt{|t^2 - 4yz|} \pm t)^2}{4y^2} \quad (12)$$

kde:

$$t = f_n - \frac{n}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}, \quad y = \frac{n}{2l\sqrt{\rho A}}, \quad z = \frac{n}{2l\sqrt{\rho A}} \left(4 + \frac{n^2 \pi^2}{2} \right) \frac{EI}{l^2} \quad (13)$$

3 EXPERIMENTÁLNE STANOVENIE SÍL V ZÁVESOCH

Experimentálne stanovenie síl v závesoch z vlastných frekvencií bolo použité na oblúkovej lávke pre peších cez ulicu Porážkovú, železničnú trať a ulicu Frýdlantskú v Ostrave. Lávka vytvára prístup do OC Forum Nová Karolína. Cieľom merania bolo zhodenie stavu namáhania jednotlivých závesov.

Popis konštrukcie

Meraná konštrukcia celkovej dĺžky 144,84 m je tvorená oceľovým spojitém trámom. Lávka má 4 polia, tretie pole s dĺžkou 84,85 m je zavesené na dvojicu dovnútra uklonených oceľových oblúkov. Oblúky majú rozpätie 102,396 m a výšku 29,79 m. Použité závesy sú priemeru 22 mm, systému Macalloy 460. Závesy sú umiestnené symetricky po oboch stranách lávky v celkovom počte $2 \times 18 = 36$ ks.



Obr. 3 Meraná konštrukcia.

Priečný rez je tvorený trámom s vodorovnou dolnou pásnicou a uklonenými stojinami s ortotropnou hornou mostovkou. Číslovanie závesov a rozlíšenie pravej a ľavej strany je od OC Nová Karolína.

Meranie

Kmitanie závesov bolo zaznamenávané snímačom zrýchlenia - akcelerometer B1, SEIKA Mikrosystemtechnik GmbH, umiestneným na závese v priečnom horizontálnom smere. Uchytenie snímača na záves bolo realizované pomocou oceľovej svorky s rovnou plochou pre umiestnenie snímača.

Kmitanie závesov bolo vybudené úderom palice s gumovou hlavou v bode s dostatočnou vzdialenosťou od konca závesu, čím boli účinne vybudené nižšie tvary kmitu. Zároveň bola vylúčená ostatná premávka na lávke.

Zrýchlenie bolo zaznamenávané s vzorkovacou frekvenciou 1200 Hz po dobu 90 s.



Obr. 4 Časový záznam kmitania závesu ZP09.

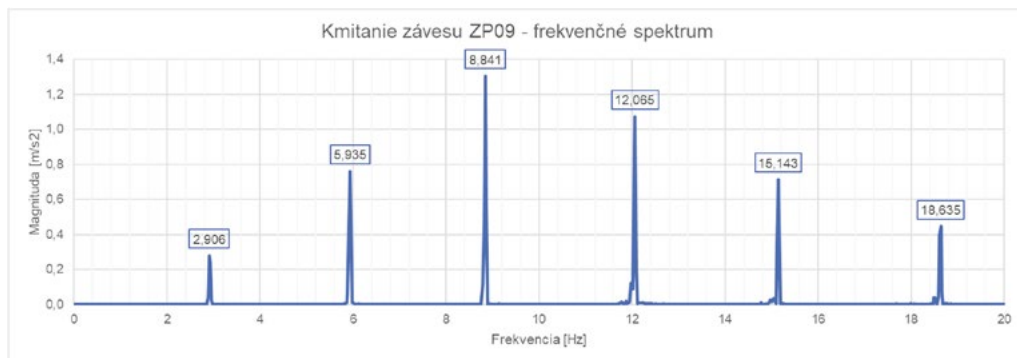
4 VÝSLEDKY

Vyhodnotenie merania prebehlo v softvéri NextView 4. Vyhodnotenie pozostávalo z frekvenčnej analýzy signálu metódou FFT [4].

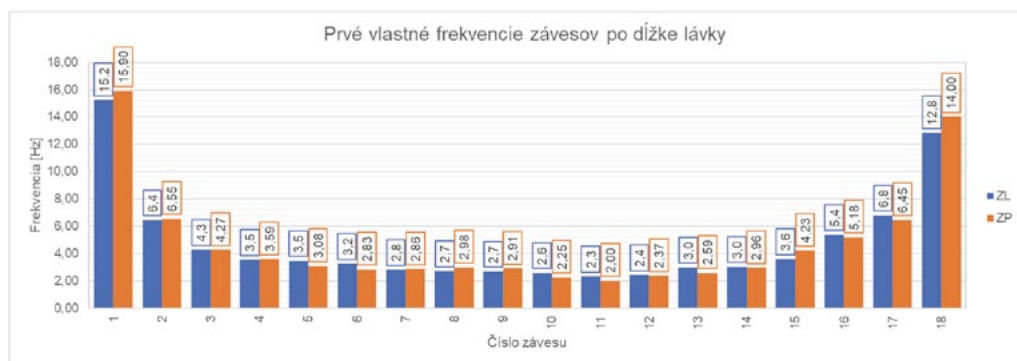
Fourierova transformácia signálu do frekvenčnej domény prebehla za použitia Hanningovho časového okna [5]. Za účelom zmenšenia frekvenčného kroku bol pre Fourierovu transformáciu signál upravený – zbavený šumu filtráciou dolnopriepustným filtrom a následne redukovaný. Úpravami bol tak docielený rozlišovací krok frekvencie $\Delta f = 0,0244$ Hz.

Vlastné frekvencie závesov

Vlastné frekvencie jednotlivých závesov boli stanovené z priebehov frekvenčných spektier - vlastná frekvencia je indikovaná vrcholom vo frekvenčnom spektre.



Obr. 5 Frekvenčné spektrum závesu ZP09.



Obr. 6 Prvé vlastné frekvencie závesov.

Sily v závesoch

Pre výpočet síl v jednotlivých závesoch boli použité vzťahy (11) a (12).

Tab. 1 Stanovené sily v závesoch.

Označenie závesu	Dĺžka závesu [m]	Sila votknutie [kN]	Sila kĺb [m]	Rozdiel síl [%]	Označenie závesu	Dĺžka závesu [m]	Sila votknutie [kN]	Sila kĺb [m]	Rozdiel síl [%]
ZL01	3,83	28,2	39,1	38,8	ZP01	3,83	31,4	42,7	36,3

Tab. 1 Stanovené sily v závesoch – pokračovanie

ZL02	7,70	24,6	29,1	18,3	ZP02	7,70	25,4	30,0	17,9
ZL03	10,36	20,2	23,2	14,6	ZP03	10,36	20,2	23,2	14,6
ZL04	12,24	19,8	22,3	12,3	ZP04	12,24	20,4	22,9	12,1
ZL05	13,60	24,1	26,4	9,9	ZP05	13,60	18,7	20,8	11,3
ZL06	14,59	24,5	26,7	9,1	ZP06	14,59	18,3	20,3	10,6
ZL07	15,29	20,0	21,9	9,6	ZP07	15,29	20,7	22,7	9,4
ZL08	15,76	19,8	21,7	9,4	ZP08	15,76	24,2	26,2	8,4
ZL09	16,03	20,2	22,1	9,1	ZP09	16,03	23,8	25,8	8,3
ZL10	16,09	18,8	20,6	9,4	ZP10	16,09	14,0	15,5	11,1
ZL11	15,94	14,6	16,2	10,9	ZP11	15,94	10,7	12,1	12,9
ZL12	15,58	15,2	16,8	11,0	ZP12	15,58	14,5	16,2	11,2
ZL13	14,99	21,7	23,7	9,4	ZP13	14,99	16,1	17,9	11,1
ZL14	14,10	19,6	21,7	10,6	ZP14	14,10	18,6	20,6	10,9
ZL15	12,81	22,6	25,1	10,9	ZP15	12,81	31,9	34,8	9,1
ZL16	10,95	37,4	41,1	9,8	ZP16	10,95	34,6	38,2	10,3
ZL17	8,22	32,1	36,8	14,6	ZP17	8,22	28,7	33,2	15,6
ZL18	4,07	21,8	31,1	42,4	ZP18	4,07	27,2	37,3	36,8

5 ZÁVĚR

Z experimentálneho stanovenia síl v závesoch na lávke je možné stanoviť niekoľko záverov.

Stanovenie síl v závesoch pomocou vzťahov medzi vlastnou frekvenciou ich priečneho kmitania a predpínacou silou sa preukázalo ako vhodné a efektívne. Metóda je rýchla a neinvazívna - nevyžaduje žiaden zásah do konštrukcie. Meranie je navyše opakovateľné, metódu je tak možné použiť na dlhodobé sledovanie zmien napätia v lanách.

Použitie vzťahu pre votknutý alebo klbovo uložený nosník dáva rozličné výsledky. Rozdiel v stanovenej sile je závislý hlavne na dĺžke závesu - pre krátke závesy je tento rozdiel až okolo 40 %. Pre závesy s dĺžkou okolo 16 m je rozdiel v stanovených silách menší - rádovo 10 %.

Pri použití jednotlivých vzorov na stanovenie síl je tak potreba správne zohľadniť spôsob uchytenia závesu k nosnej konštrukcii. Vzhľadom na spôsob upevnenia závesov na meranej konštrukcii sa tak javí ako vhodnejší výpočet pre votknutý nosník.

Podakovanie

Teoretické podklady pre prezentované výsledky boli získané za finančnej podpory z prostriedkov štátneho rozpočtu prostredníctvom TAČR v rámci projektu CK01000042 „Upřesnění zbytkové únosnosti předpjatých mostů“.

Použitá zdroje

- [1] GEIER, Roman, Guido DE ROECK a Johannes PETZ. Cable Force Determination for the Danube Channel Bridge in Vienna. *Structural Engineering International*. 03/2005n. 1.
- [2] BREPTA, Rudolf, František TUREK a Ladislav PŮST. *Mechanické kmitání*. Praha: Sobotáles, 1994. Česká matice technická (Sobotáles). ISBN 80-901-6848-5. Citace 2
- [3] NEČAS, Michael. *Meření napětí v táhlech pomocí vlastních frekvencí*. Praha, 2010. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [4] SMITH, Steven W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing* [online]. [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <http://www.dspguide.com/pdfbook.htm>
- [5] BILOŠOVÁ, Alena. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012 [cit. 2019-08-28]. ISBN 978-80-248-2758-2. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2758-2.pdf>

MOŽNOSTI NEPRIAMEHO URČOVANIA PREDPÄTIA

POSSIBILITIES OF INDIRECT DETERMINATION OF PRESTRESSING

Jakub Kralovanec^{*1}, Martin Moravčík¹

^{*}jakub.kralovanec@uniza.sk

¹Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta, Katedra stavebných konštrukcií a mostov, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Abstrakt

Sú prípady, v ktorých je potrebné určiť stav predpätia v konkrétnom čase na existujúcich konštrukciách. Vtedy môžeme výhodne použiť nepriame metódy zisťovania predpätia. Tieto pozostávajú z pozorovania vybraných veličín na predmetnej konštrukcii, na základe ktorých je následne možné analyticky prepočítať aktuálnu úroveň predpätia. Medzi pozorované veličiny patria napr. pomerné pretvorenia, deformácie, šírka trhlin a iné. Tento príspevok sa venuje prehľadu možných nepriamych metód na určenie predpätia v konštrukcii.

Kľúčové slová

Predpätý betón, predpínacia sila, nepriame metódy

Abstract

There are situations when it is necessary to determine the state of prestressing at a specific time on existing structures. In these cases, it is possible to use indirect methods for determining the state of prestressing. These methods consist of the observation of selected quantities on the investigated structure. Subsequently, based on obtained results it is possible to analytically calculate the actual state of prestressing. The observed quantities include e.g., strain, deformations, crack width etc. This paper presents an overview of possible indirect methods for determining the prestressing in the structure.

Key words

Prestressed concrete, prestressing force, indirect methods

1 ÚVOD

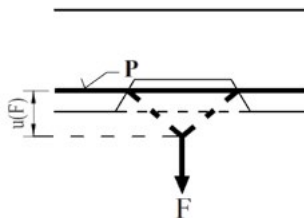
V oblasti zameranej na zisťovanie predpätia v existujúcich konštrukciách pôsobia v domácich a zahraničných podmienkach viacerí odborníci. V rámci Slovenska ide predovšetkým o kolektív pozostávajúci z Milana Chandogu, Andreja Jaroševiča a Petra Faba [1]. Im podobnej oblasti sa venujú aj kolegovia napr. z Českej republiky okolo Tomáša Klieru, Tomáša Míčku a Michala Poláka [2], [3]. Zo zahraničia sú v rámci danej oblasti zaujímavé práce a výsledky zo švédskej University of Technology v meste Luleå. Tu pôsobí tím zložený z výskumníkov ako sú Niklas Bagge, Jonny Nilimaa, Lennart Elfgren, Thomas Blanksvärd a ďalší [4], [5]. Ďalej je možné spomenúť práce Briana M. Kukaya, Paula J. Barra, Marvina W. Hallinga a Kevina Womacka pôsobiacich na Utah State University v Spojených štátoch amerických, ktorí tiež pôsobia v oblasti vývoja metód na určenie úrovne reziduálneho predpätia [6], [7]. Vo všeobecnosti môžeme v súčasnosti používané metódy rozdeliť do dvoch základných skupín, a to na priame a nepriame metódy zisťovania úrovne predpätia. Ďalej budú odprezentované základné nedeštruktívne a deštruktívne nepriame metódy, ktoré sú ústredným motívom tohoto príspevku. Avšak, v prípade niektorých metód je pomerne komplikované posúdiť, či ide ešte stále o nedeštruktívnu metódu alebo je nutné ju zaradiť už medzi deštruktívne metódy overovania hodnoty predpínacej sily, pretože mnohí autori sa často v delení metód rozchádzajú.

2 NEDEŠTRUKTÍVNE NEPRIAME METÓDY

Ako nedeštruktívne nepriame metódy sú označené tie, ktoré nemajú žiaden, resp. len veľmi zanedbateľný vplyv na predmetnú konštrukciu. Ujma spôsobená pomerne malým zásahom do konštrukcie sa v prípade týchto metód dá relatívne jednoducho a rýchlo opraviť.

Metóda vychýlenia predpínacej výstuže

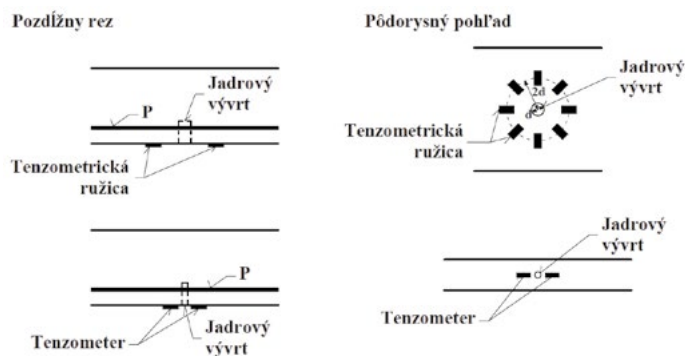
Po opatrnom odhalení predpínacej výstuže je možné na základe vzťahu medzi výchylkou predpínacej jednotky a priečnou silou, ktorá túto výchylku vyvolala, určiť skutočnú hodnotu predpínacej sily. Jednou z nevýhod tejto metódy je potreba získania kalibračných údajov, ktoré vystihujú konkrétne podmienky. Nevýhodosťou je znalosť dimenzií predpínacej výstuže a rovnako tak dĺžku, na ktorej je táto výstuž odhalená. Potreba opatrného odhalenia predpínacej výstuže je taktiež nevýhodou tejto techniky. V praxi sa pomerne často stretávame s prípadmi, v ktorých nie je možné predpínaciu výstuž odhaliť pri zachovaní prevádzky na predpätej konštrukcii, čo môže v konečnom dôsledku znemožniť aplikáciu tejto metódy [4], [5], [8].



Obr. 1 Metóda vychýlenia predpínacej výstuže [4], [8].

Metóda uvoľnenia napätia v okolí jadrového vývrtu

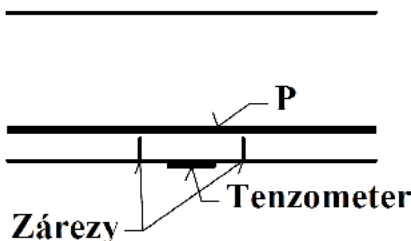
Pozorovanie zmeny napätia v okolí jadrového vývrtu relatívne malého priemeru je jednou z ďalších možností ako určiť aktuálnu hodnotu predpínacej sily. Radiálne napätie na hrane vývrtu je nulové, a teda sledujeme úplné lokálne uvoľnenie napätia, pričom od hrany vývrtu napätie postupne opäť narastá. Metóda uvoľnenia napätia v okolí vývrtu je teda založená na uvoľnení napätia v betóne vrtaním a následnom meraní zmeny pomerných pretvorení na jeho povrchu. Na základe merania zmeny pomerných pretvorení vo vzdialenosti asi dvoch priemerov vrtaného otvoru od stredu vývrtu, môžeme určiť pôvodnú hodnotu napätia, ktoré sa v prvku nachádzalo pred samotným vrtaním. Napätie sa uvoľní vrtaním diamantovým vrtákom, ktorý vytvorí otvor s priemerom 77 až 79 mm s hĺbkou od 100 do 175 mm [9]. Iná literatúra [10] uvádza, že priemer jadrového vývrtu má mať aspoň 50 mm, ideálne 100 mm. Problémom je, že plytké vývrty spôsobia iba čiastočné uvoľnenie napätia. Preto je nutné splniť podmienku, podľa ktorej má byť hĺbka vývrtu aspoň dvojnásobná v porovnaní s jeho priemerom. Kvôli presnosti merania je nevyhnutné presne stanoviť veľkosť modulu pružnosti betónu, pričom na tento účel je možné použiť odobratý jadrový vývrt. Otáznym je vplyv zvýšenej teploty, ktorá súvisí s vrtaním do betónu.



Obr. 2 Metóda uvoľnenia napätia v okolí jadrového vývrtu [4], [8], [11].

Rezová metóda uvoľnenia napätia

Princíp rezovej metódy je podobný tomu, na ktorom je založená aj už uvedená vrtacia metóda. Malým zásahom do konštrukcie uvoľníme napätie v predpätom prvku. Týmto spôsobom izolujeme betónový blok od vonkajších síl. Príslušnú zmenu pomerných pretvorení meriame medzi zárezmi použitím tenzometrických snímačov. Ak narastajúca hĺbka zárezov už viac nespôsobuje výraznú zmenu pomerných pretvorení v príľahlých miestach, betónový blok je možné považovať za úplne izolovaný. Aj v tomto prípade je potrebné očistiť získané výsledky od vplyvu zvýšenej teploty vyplývajúcej z rezania betónu [4], [9].



Obr. 3 Rezová metóda uvoľnenia napätia v sledovaných vláknach betónového prierezu [4], [8].

Metóda sledovania odozvy konštrukcie na vonkajšie zaťaženie

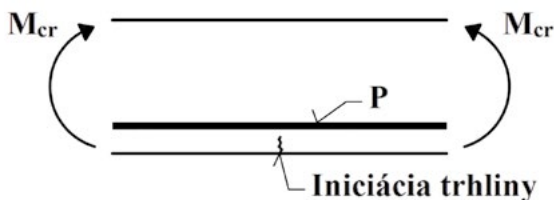
V niektorých prípadoch je potrebné, pre úplnosť posúdenia stavu predpätej (popríklad inej) konštrukcie, aby sa uskutočnila tzv. skúška odozvy konštrukcie na vonkajšie zaťaženie (zjednodušená zaťažovacia skúška). Na predmetnej konštrukcii sú pozorované zmeny pretvárných veličín, ako sú deformácie, pomerné pretvorenia, či šírka trhlín vzhľadom na veľkosť aplikovaného vonkajšieho zaťaženia. Inou možnosťou je geodetické sledovanie trvalých deformácií konštrukcie od stálych zložiek zaťaženia. Pred skúškou odozvy konštrukcie na vonkajšie zaťaženie je veľmi dôležitá dôkladná obhliadka konštrukcie, na základe ktorej je následne stanovená hodnota skúšobného zaťaženia. Veľkosť zaťažovacieho impulzu je individuálna z dôvodu, že stav predpätých konštrukcií v prevádzke je rôzny. Vhodné je zaťažovať konštrukciu v postupných krokoch, ak je to potrebné aj s prípadným odľahčovaním. Princíp podobný tejto metóde má aj skúška v rámci neskôr uvedených deštruktívnych metód na stanovenie úrovne predpätia – metóda iniciácie trhliny a metóda dekompresného zaťaženia. Tieto metódy sa niekedy uvádzajú ako súčasť práve metód sledovania odozvy na vonkajšie zaťaženie [8], [13].

3 DEŠTRUKTÍVNE NEPRIAME METÓDY

Medzi deštruktívne metódy sa zaraďujú tie, ktorými je nevyhnutne spôsobený nezanedbateľný zásah do vyšetrovanej konštrukcie. Zásah tohoto rozsahu je už veľmi významný, a teda nie je jednoduché a možné úplne napraviť škody spôsobené v skúmanej konštrukcii. Rozsah a umiestnenie zásahu by sa mali zvoliť s ohľadom na zachovanie integrity konštrukcie.

Metóda iniciácie trhliny

Táto technika je založená na postupnom zaťažovaní predmetnej konštrukcie až do objavenia prvej statickej trhliny. Odolnosť prvku v ťahu a napätie, ktoré sa nachádza v predpínacej výstuži pri skúšaní priamo ovplyvňujú kritickú hodnotu ohybového momentu od vonkajšieho zaťaženia a medzi vzniku prvej trhliny. Po objavení prvej trhliny je možné pozorovať náhly pokles tuhosti, pričom získané výsledky nemusia byť dostatočne presné predovšetkým v prípadoch, v ktorých nie sú známe spoľahlivé hodnoty odolnosti v ťahu overovaného prvku. Z tohoto dôvodu je potrebné zistiť odolnosť betónu v ťahu tesne pred pripravovanou skúškou. Pri skúšaní je nevyhnutné sa snažiť vytvoriť vhodnú zaťažovaciu schému oblasti čistého ohybu. Voľba štvorbodového ohybu je preto z tohto pohľadu veľmi výhodná. Pred testom sa vykoná dôkladná inšpekcia konštrukcie, ktorá má overiť či sa na nej už náhodou nenachádzajú nejaké statické trhliny [4], [8], [13].



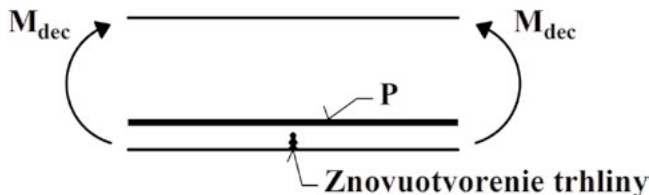
Obr. 4 Metóda iniciácie trhliny [4], [8].

Metóda dekompresného zaťaženia

Nasledujúci prístup vyžaduje vyvodenie takého zaťaženia, ktoré vyvolá opätovné otvorenie už existujúcej statickej trhliny. Vo všeobecnosti sa považuje za presnejšiu než skôr uvedená metóda iniciácie trhliny - trhlina je jasne lokalizovaná už pred testom. V rámci skúšky je teda pozorovaná vybraná trhlina na povrchu skúmaného prvku, pričom konštrukcia je postupne zaťažovaná. Lineárna závislosť medzi šírkou otvárajúcej sa trhliny a aplikovaným vonkajším zaťažením sa dá pozorovať do istej úrovne zaťaženia, ktoré sa volá dekompresné zaťaženie. Počas testu sú zaznamenávané pomerné pretvorenia na prilahlých miestach, poprípade pretvorenie naprieč trhlinou. Navyše, po prekročení dekompresného zaťaženia dôjde k dramatickej zmene tuhosti. Z nameraných hodnôt a známeho zaťaženia je následne možné určiť hodnotu predpínacej sily výpočtom. Je potrebné spomenúť, že v prípade staticky neurčitých konštrukcií je táto výpočtová metóda iteratívna, keďže je potrebné zohľadniť príspevok sekundárnych účinkov predpätia. Vo výpočte je dekompresné zaťaženie zohľadnené ohybovým momentom od pôsobenia vonkajšieho zaťaženia. Presnosť metódy závisí aj od určenia polohy neutrálnej osi predpätého prvku. Metóda dekompresného zaťaženia je väčšinou považovaná za deštruktívnu z dôvodu, že posudzovaný prvok musí už vopred obsahovať statické trhliny [4], [8], [13].

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{P \cdot e_p}{I_y} \cdot z + \frac{M_R}{I_y} \cdot z + \frac{M_G}{I_y} \cdot z + \frac{M_Q}{I_y} \cdot z \quad (1)$$

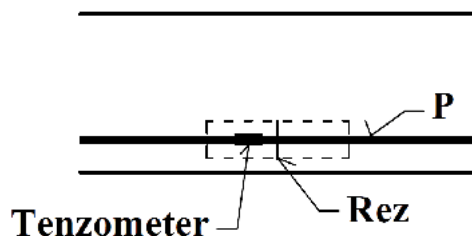
kde: σ – napätie na monitorovanom povrchu betónu,
 P – hodnota predpínacej sily,
 A – plocha prierezu,
 e_p – excentricita predpínacej sily,
 z – vzdialenosť medzi neutrálnou osou a monitorovaným miestom,
 I_y – moment zotrvačnosti prierezu,
 M_R – ohybový moment zohľadňujúci sekundárne účinky predpätia,
 M_G – ohybový moment od pôsobenia stálego zaťaženia,
 M_Q – ohybový moment od pôsobenia vonkajšieho zaťaženia.



Obr. 5 Metóda dekompresného zaťaženia [4], [8].

Metóda uvoľnenia napätia na predpínacej výstuži

V prípade využitia metódy uvoľnenia napätia na predpínacej výstuži je nevyhnutné ako prvé predpínaciu výstuž opatrne odhaliť a následne aplikovať tenzometrický snímač na predpínaciu výstuž v blízkosti zamýšľaného rezu. Úlohou tenzometra je zaznamenať zmenu pomerných pretvorení po prerezaní predpínacej jednotky. Zo získaných údajov o zmene pomerných pretvorení po prerezaní predpínacej výstuže, jej ploche a materiálových charakteristikách je možné následne vypočítať aktuálnu hodnotu predpínacej sily. Avšak, uspokojivá aplikácia tenzometra môže byť v niektorých prípadoch pomerne komplikovaná.



Obr. 6 Metóda uvoľnenia napätia na predpinacej výstuži [4], [8].

4 ZÁVER

V našich aj medzinárodných podmienkach je množstvo predpätých mostov v zlom či až havarijnom stave. Je známy celý rad metód na určenie aktuálnej úrovne predpätia v skúmanom čase. Vo svetle mimoriadnych situácií, ktoré sa v poslednej dobe odohrávajú na existujúcich predpätých mostoch je jasné, že je potrebné vytvoriť spoľahlivé postupy na stanovenie aktuálnej hodnoty predpätia v overovaných konštrukciách. Mnohé zo spomínaných metód zatiaľ neboli dostatočne overené na reálnych konštrukciách v prevádzke. Pre niektoré sú zase k dispozícii iba výsledky laboratórnych skúšok vykonaných na jednoduchých prvkoch. Z tohto dôvodu je nevyhnutné pre stanovenie ich presnosti a spoľahlivosti pokračovať v ich overovaní v laboratóriu, ale hlavne na reálnych konštrukciách v praxi. Iba takýmto spôsobom je možné vytvoriť použiteľné odporúčania pre ich praktickú a bezpečnú aplikáciu. Predovšetkým je potrebné sa zamerať na výskum pomerne jednoducho realizovateľných metód, ktoré majú nedeštruktívny alebo len veľmi málo deštruktívny charakter. V praktickom využívaní je potrebné mať možnosť použiť danú metódu čo najrýchlejšie, najlacnejšie a najjednoduchšie pri zachovaní požadovanej presnosti.

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol za podpory grantovej agentúry VEGA číslo 1/0045/19 a Grantového systému UNIZA číslo 7957.

Použité zdroje

- [1] Chandoga, M. – Jaroševič, A. – Fabo, P.: Skutočná napätosť viačlanových káblov napínaných po jednotlivých lanách. Dostupné na: https://projstar.sk/_files/200000070-2ed4f2fcfd/JarChanFab.pdf
- [2] Klier, T. – Míčka, T. – Polák, M. – Plachý, T. – Hedbávný, M. – Jelínek, M. – Bláha, F.: Application of the Modified Magnetoelastic Method and an Analysis of the Magnetic Field. Acta Polytechnica CTU Proceedings 15:46-50; 2018.
- [3] Klier, T. – Míčka, T. – Polák, M. – Plachý, T. – Hedbávný, M. – Krejčíková, L.: New Information About Practical Application of the Modified Magnetoelastic Method. MATEC Web of Conferences 310, 00026 (2020); Space 2019.
- [4] Bagge, N. – Nilimaa, J. – Blanksvård, T. – Elfgren L.: Instrumentation and Full-Scale Test of a Post-Tensioned Concrete Bridge. Nordic Concrete Research 2014; 51:63-83.
- [5] Bagge, N. – Nilimaa, J. – Elfgren, L.: In-situ Methods to Determine Residual Prestress Forces in Concrete Bridges. Engineering Structures; 2017.
- [6] Kukay, B. M.: Bridge Instrumentation and the Development of Non-Destructive and Destructive Techniques Used to Estimate Residual Tendon Stress in Prestressed Girders. Utah State University, Logan, Utah, United States; 2008.
- [7] Kukay, B. M. – Barr, P. J. – Halling, M. W. – Womack, K.: Determination of the Residual Prestress Force of In-Service Girders Using Non-Destructive Testing. Structures Congress 2010. Orlando, Florida, United States: American Society of Civil Engineers; 2010.
- [8] Moravčík, M. – Bahleda, F. – Jošt, J.: Využitie nepriamych metód stanovenia úrovne predpätia v konštrukcii. Betonárske dni 2018, Zborník príspevkov; November 8-9, 2018.
- [9] fib, Comité Euro – International du Béton: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures. Guidance Report. fib Bulletin No. 243; May 1998.
- [10] TP 059: Zadávanie a výkon diagnostiky mostov. SSC Bratislava 2012. Dostupné na: https://www.ssc.sk/files/documents/technicke-predpisy/tp/tp_059.pdf

- [11] Kucharík, J., 2008. Diagnostika účinku predpätia na betónových mostoch v prevádzke. Betonárske dni 2008, Bratislava.
- [12] Moravčík, M. – Bujňáková, P.: Analysis of Brittle Failure of Prestressed Bridge in the North of Slovakia. ROCZNIKI INŻYNIERII BUDOWLANEJ – ZESZYTY 17/2017.
- [13] Moravčík, M. – Bujňáková, P. – Bahleda, F.: Conceptual Problems of First Generation of Precast Bridges. International fib Symposium on Conceptual Design of Structures, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid, Spain; September 26-28, 2019.
- [14] Moravčík, M. – Bujňáková, P. – Bahleda, F.: Príčiny havárie a rekonštrukcia predpätého mosta v Podbieli. BETON; 4/2017.

VPLYV VYBRANÝCH PARAMETROV NA NAPÄTIA V SKRUTKOVOM SPOJI V SKLE

EFFECT OF THE CHOSEN PARAMETERS ON STRESS IN BOLTED CONNECTION IN GLASS

Lucia Ondrušková¹

*lucia.ondruskova@stuba.sk

¹ Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra kovových a drevených konštrukcií, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

Abstrakt

V miestach uchytenia sklenených konštrukcií dochádza k vzniku zvýšených napätí, ktoré môžu byť pre návrh skleneného prvku rozhodujúce. Súčasnú normu ponúkajú odporúčania pre minimálne vzdialenosti umiestnenia skrutkového spoja od okraja. Pre overenie detailov sú používané modely v software-i na báze MKP. V tomto príspevku je porovnaný vplyv vzdialenosti skrutkového spoja od okraja a hrúbky materiálu na hodnotu maximálneho napätia na okraji otvoru pri pôsobení zaťaženia v rovine skleneného prvku.

Klíčovú slova

Sklené konštrukcie, bodový úchyt, skrutkový spoj

Abstract

Increased stresses occur near the supports of glass structures, which can be decisive for design of glass member. Recommendations for minimum distance of the bolted connection from the edge can be found in current standards. For verification of details are used FE-models. Influence of the edge distance and material thickness on the maximum stress value at the edge of hole in glass loaded in its plane is compared in this paper.

Key words

Glass structures, point fixing, bolted connection

1 ÚVOD

V konštrukciách, ako presklené fasády alebo prestrešenia, je snaha maximalizovať transparentnú plochu a nosnú konštrukciu navrhnuť čo najsubtilnejšiu. Sklo ako materiál nosných prvkov je používané v čoraz odvážnejších aplikáciách. Nároky na únosnosť sklenených prvkov tak rastú. Pre sklo je charakteristické elastické správanie. Pri prekročení pevnosti materiálu nastáva krehké porušenie, preto je potrebné venovať náležitú pozornosť detailom v ktorých dochádza ku vzniku špičiek napätia. Tento článok porovnáva vplyv vzdialenosti skrutkového spoja od okraja a hrúbky skla na maximálne napätia na MKP modeli skrutkového spoja.

2 POPIS SÚČASNÉHO STAVU

Skrutkové spoje, vzhľadom na vznikajúce napätia v okolí otvoru, vyžadujú použitie tepelne upraveného skla. V mieste otvoru dochádza k zmene priebehu reziduálnych napätí v skle a vplyvom vrátenia k zvýšenému výskytu mechanických poškodení povrchu skla, čo negatívne ovplyvňuje pevnosť skla v tejto oblasti. Výhodou týchto spojov je ľahká rozoberateľnosť a estetika.

Platný Eurokód venujúci sa návrhu sklenených konštrukcií a ich detailov poskytujúci postup pre overenie skrutkového spoja v súčasnosti neexistuje, no odporúčania pre návrh sa dajú nájsť v národných normách. Ide predovšetkým o odporúčania ohľadom umiestnenia spoja od okraja. Základom pre návrh spoja je numerická analýza, experimentálny výskum a vedecké publikácie.

V norme EN 12150 [1] sú uvedené podmienky pre umiestnenie otvorov v tepelne tvrdenom skle. Podmienkou je, že v sklenom prvku sa môžu nachádzať maximálne štyri otvory. Vzdialenosť okraja otvoru od okraja skla by

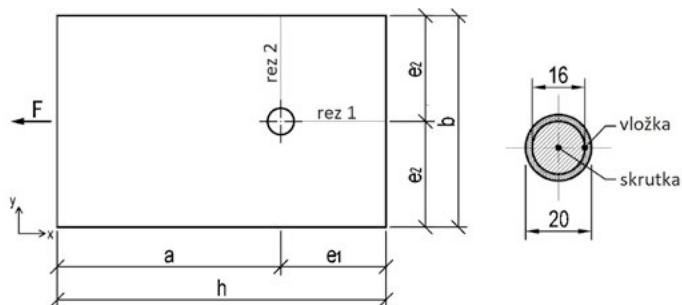
mala byť minimálne $2d$ (pričom d je hrúbka skla) a od rohu skleneného prvku by mal byť vzdialený minimálne $6d$. Minimálna osová vzdialenosť bodového uchytienia od okraja je v norme STN 74 3305 [2] je určená ako 80 mm.

Tento problematike sa taktiež venovali viacerí autori. Vo svojich dizertačných prácach sledovali vplyv viacerých parametrov na napätia na okraji otvoru v skle pri skrutkovom spoji Maniatis [3] a Vencel [4] - materiál vložiek medzi sklom a skrutkou, medzera medzi skrutkou a otvorom, trenie medzi skrutkou a otvorom, excentricita zaťaženia, zmena v pomere priemeru otvoru k šírke skleneného panela [3], v [4] to bol vplyv materiálu vložky medzi sklom a skrutkou, počet spojovacích prostriedkov a ich osové vzdialenosti, zahrnutie vplyvu nepresnosti pri vŕtaní.

3 METODIKA

V software-i Ansys bol vytvorený objemový model skrutkového spoja. Model pozostával zo skleneného prvku, oceľovej skrutky priemeru 16 mm a hliníkovej vložky medzi skrutkou a sklom s hrúbkou 2 mm. Priemer otvoru bol 20 mm - medzi jednotlivými komponentami nebola medzera. Použitá hrúbka skla bola 10 mm a 12 mm. Geometria vzorky je znázornená na Obr. 1. Rozmer a bol 300 mm. Vzdialenosti e_1 a e_2 sa menili. Pokiaľ bola menená vzdialenosť e_1 , tak vzdialenosť e_2 zostávala nemenná - 80 mm alebo 160 mm pre hrúbku skla 10 mm, 80 mm pre hrúbku skla 12 mm. Pokiaľ bola menená vzdialenosť e_2 , potom vzdialenosť e_1 zostávala nemenná.

Označenie modelu pozostávalo z údajov o hrúbke skla a vzdialenosti spoja od okraja vo forme **t-X_e1-X_e2-X**, napr. **t-10_e1-60_e2-80** znamená, že ide o model s hrúbkou skla 10 mm, vzdialenosťou od okraja e_1 60 mm a vzdialenosťou od okraja e_2 80 mm.



Obr. 1 Geometria skleneného prvku a detail skrutky a vložky.

Na prednú plochu skla bola aplikovaná sila 5 kN a jej pôsobenie bolo rovnomerne rozložené na zvolenú plochu. V strihových rovinách skrutky bola zadaná pevná podpera.

Vzhľadom na nízke aplikované zaťaženie sa v kovových častiach prípoja - skrutka a vložka - nepredpokladal vznik plastických deformácií. Použitý bol lineárne elastický materiálový model. Vlastnosti materiálov boli definované pomocou hustoty, Youngovho modulu pružnosti a Poissonovým číslom. Model pružnosti v šmyku bol určený na základe posledných dvoch spomenutých veličín. Použité hodnoty sú uvedené v tab. 1.

Tab. 1 Materiálové charakteristiky.

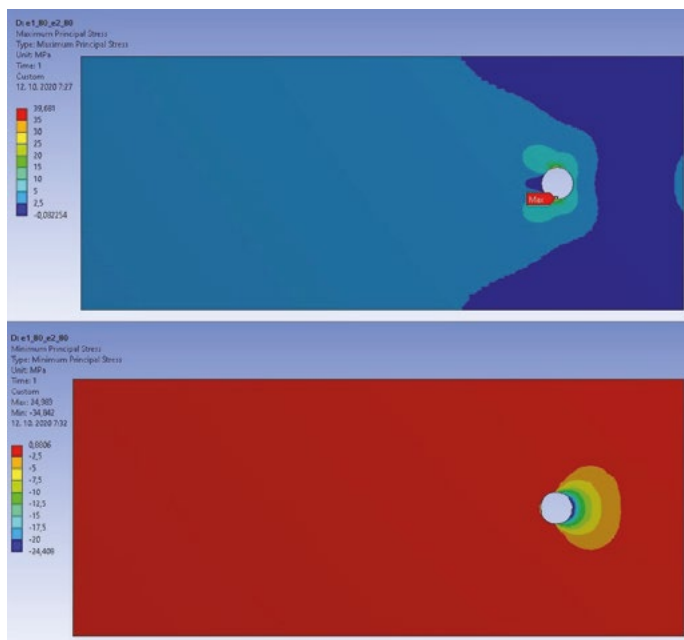
	Hustota	Youngov modul pružnosti	Poissonovo číslo	Modul pružnosti v šmyku
	ρ	E	ν	G
	[kg/m ³]	[MPa]	[-]	[MPa]
Sklo	2500	70000	0,23	28455
Oceľ	7850	210000	0,30	80769
Hliník	2700	70000	0,30	26923

Sieť bola v okolí otvoru zjemnená, obvod otvoru bol rozdelený na 48 častí. Po hrúbke skla bola veľkosť delenia na konečné prvky nastavená na 2 mm. Použitý typ elementov bol SOLID186, čo je objemový prvok s 20-timi uzlami, pričom každý uzol má 3 stupne voľnosti – posun v smere osi x , y a z . Na kontakt medzi plochami skrutka-vložka a vložka-sklo bol použitý CONTA174, ktorý sa používa na znázornenie dotyku a posuvu medzi 3D cieľovým povrchom (TARGE 170) a deformovateľným povrchom zadaným prvkom CONTA 174. Väzba medzi plochami bola schopná prenášať tlak, ťah nie. Model možno považovať za zjednodušený, keďže kontakte nebol zohľadnený vplyv trenia - posun medzi komponentami spoja nebol umožnený, iba ich vzájomné

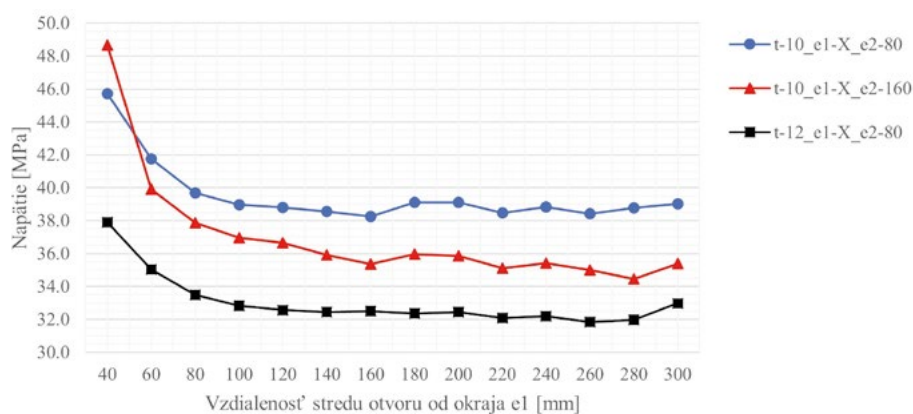
oddeľovanie. Vzhľadom na to, že ide o kontaktnú úlohu, bola potrebná nelineárna analýza. Použitá bola Newton-Rhapsonova metóda.

4 VÝSLEDKY

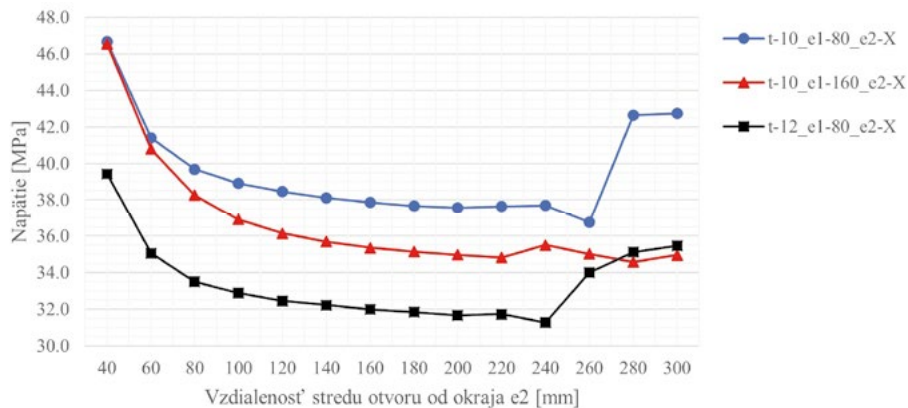
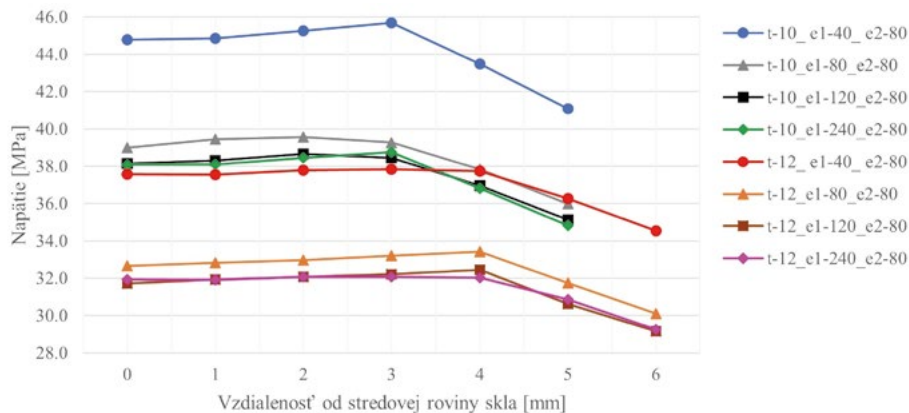
V detaile dochádzalo k otláčaní skrutky cez prechodovú vložku do skla. Z hľadiska skleneného prvku rozhodujúce hlavné napätia σ_1 vznikali na okraji otvoru v blízkosti rezu 2. Vplyv vzdialenosti skrutkového spoja od okraja na napätia je znázornený na Obr. 3 a 4. So zvyšujúcou sa vzdialenosťou od okraja napätia zväčša klesali, avšak pri vyšších hodnotách e_2 možno pozorovať výnimky. Na Obr. 5 je pre vybrané prípady vykreslený priebeh napätí po hrúbke skla - od stredovej roviny skla po okraj, v mieste maximálneho hlavného napätia σ_1 na okraji otvoru. Priebeh napätí vo vnútornej časti bol približne konštantný a na okrajoch dochádzalo k poklesu napätí.



Obr. 2 Maximálne (hore) a minimálne (dole) hlavné napätia.



Obr. 3 Maximálne hodnoty napätí σ_1 pri meniacej sa vzdialenosti e_1 .

Obr. 4 Maximálne hodnoty napätí σ_1 pri meniacej sa vzdialenosti e_2 .Obr. 5 Priebeh napätí po hrúbke skla - od stredovej roviny po okraj - v mieste maximálnej hodnoty napätia σ_1 .

5 DISKUSIA

Ako z Obr. 3 a Obr. 4 vidno, napätia s rastúcou vzdialenosťou od okraja, až na výnimky, klesajú. Výraznejší pokles napätí je dosiahnutý zväčšením hrúbky skla. Pokiaľ jedna zo vzdialeností e_1 alebo e_2 mala vždy rovnakú hodnotu, vplyv zmeny druhej vzdialenosti vo väčšine prípadov bol porovnateľný. Napr. pri hrúbke skla 10 mm a vzdialenosti e_1 60 mm a e_2 80 mm bolo maximálne hlavné napätie na modeli **t-10_e1-60_e2-80** 41,74 MPa, čo je zvýšenie o 5,2 % oproti **t-10_e1-80_e2-80**, na modeli s e_1 80 mm a e_2 60 mm **t-10_e1-80_e2-60** bolo maximálne hlavné napätie 41,41 MPa, čo je zvýšenie o 4,4 % oproti **t-10_e1-80_e2-80**.

Napätia pri menších vzdialenostiach e_1 alebo e_2 rastú výraznejšie. Pokiaľ pri modeloch **t-10_e1-X_e2-80** bola považovaná za referenčnú hodnotu **t-10_e1-80_e2-80**, na modeli **t-10_e1-40_e2-80** stúpili napätia o 15,2 %, na **t-10_e1-60_e2-80** stúpili napätia o 5,2 %. Na modeli **t-10_e1-100_e2-80** klesli napätia oproti **t-10_e1-80_e2-80** o 1,8 %. Ďalej sa pokles napätí pohyboval od 1,5 % po 3,6 % oproti výsledku na **t-10_e1-80_e2-80**.

Pri modeloch **t-10_e1-80_e2-X** napätia na modeli **t-10_e1-80_e2-40** sa zvýšili o 17,6 % a na modeli **t-10_e1-80_e2-60** o 4,4 % oproti **t-10_e1-80_e2-80**. Pri modeli **t-10_e1-80_e2-100** napätia poklesli o 1,9 % oproti **t-10_e1-80_e2-80**. Ďalej napätia klesali až po model **t-10_e1-80_e2-200**, kde sa napätia líšili od **t-10_e1-80_e2-80** o 5,3 %. Približne na rovnakej hodnote boli napätia ustálené až po model **t-10_e1-80_e2-240**.

Pri hrúbke skla 12 mm, čiže pri sérii modelov **t-12_e1-X_e2-80** a **t-12_e1-80_e2-X**, boli rozdiely medzi napätiami na jednotlivých modeloch podobné ako pri hrúbke skla 10 mm.

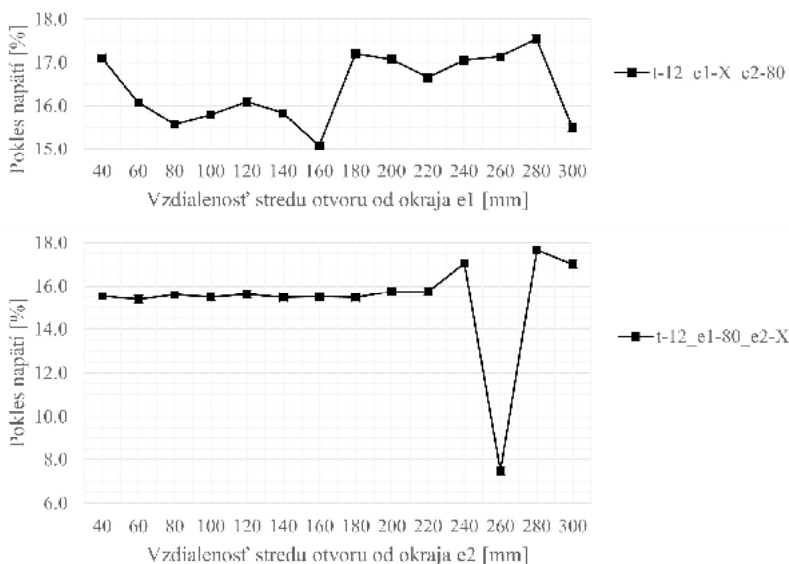
Pri modeloch **t-10_e1-X_e2-160** a **t-10_e1-160_e2-X** bola považovaná za referenčnú hodnotu maximálneho hlavného napätia na **t-10_e1-160_e2-160**. Od hodnoty na tomto modeli sa najviac odlišovali napätia

na **t-10_e1-40_e2-160**, kde stúpili napätia o 37,6 % a na **t-10_e1-160_e2-40**, kde stúpili napätia o 31,7 %. Pri sérii **t-10_e1-X_e2-160** na modeli **t-10_e1-100_e2-160** napätia stúpili o 4,6% oproti **t-10_e1-160_e2-160** a na zvyšných modeloch sa líšili od 0,1 % do 3,7 %. Pri sérii **t-10_e1-160_e2-X** na modeli **t-10_e1-160_e2-100** napätia stúpili o 4,4 % oproti **t-10_e1-160_e2-160** a na zvyšných modeloch sa líšili od 0,4 % do 2,2 %.

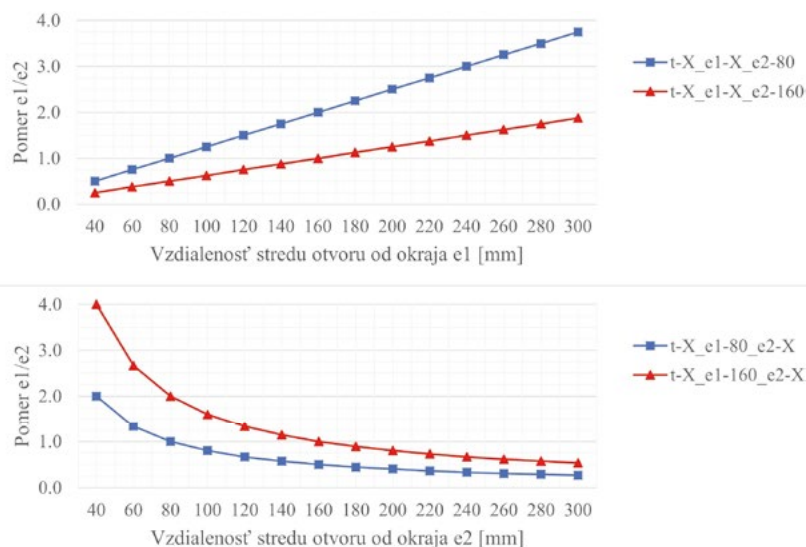
Pokiaľ sa porovnávajú napätia na modeloch s hrúbkou skla 10 mm a 12 mm a rovnakými vzdialenosťami od okraja, tak pri zväčšení hrúbky z 10 mm na 12 mm sa pokles napätí pohyboval v rozmedzí 15,1 % až 17,7 %, vid'. Obr. 6. Výnimkou je model so vzdialenosťou od okraja e_1 80 mm a e_2 280 mm.

Na Obr. 4 si možno všimnúť, že v prípadoch so vzdialenosťou e_1 80 mm a e_2 280 mm a 300 mm pri hrúbke 10 mm a v prípadoch e_1 80 mm a e_2 260 mm, 280 mm a 300 mm pri hrúbke 12 mm napätia stúpajú. V modeli **t-10_e1-40_e2-160** maximálna hodnota hlavného napätia σ_1 dosiahla dokonca vyššiu hodnotu ako na modeli **t-10_e1-40_e2-80**. Zväčšenie rozmeru e_2 malo v týchto prípadoch negatívny vplyv na veľkosť napätí - vzniká otázka, či ide o chyby modelu alebo nastavení výpočtu alebo možno formulovať záver, nízky pomer e_1/e_2 nepriaznivo vplyva na veľkosť napätí. Vo vyššie spomenutých prípadoch bol pomer $e_1/e_2 \leq 0,29$. Prehľad pomerov e_1/e_2 pre všetky použité hodnoty e_1 a e_2 je na Obr. 7.

Podmienky pre vzdialenosť otvoru od okraja definované v norme EN 12150 [1] spĺňali všetky vzorky. Pre sklo hrúbky 10 mm bolo potrebné dodržať vzdialenosť okraja otvoru od okraja skla $2d = 20$ mm a od rohu $6d = 60$ mm, pre hrúbku skla 12 mm tieto hodnoty boli $2d = 24$ mm a $6d = 72$ mm. Tieto podmienky sa však týkajú iba umiestenia samotného otvoru, bez uváženia skrutkového spoja. Podmienku z normy STN 74 3305 [2] - osová vzdialenosť bodového uchytienia od okraja má byť minimálne 80 mm - nespĺňali vzorky s jednou so vzdialenosťou e_1 alebo e_2 40 mm alebo 60 mm. Pri týchto hodnotách e_1 alebo e_2 možno na Obr. 3 a Obr. 4 pozorovať strmší sklon grafu - pri zmene jednej zo vzdialenosťi z 80 mm na 60 mm napätia stúpili od 4,4 % do 6,6 % oproti predchádzajúcej hodnote, a pri zmene z 60 mm na 40 mm napätia stúpili o 8,2 % až 21,9 % oproti predchádzajúcej hodnote. Pri zmene z 80 mm na 100 mm pokles napätí sa pohyboval od 1,8 % do 3,7 % a ďalej sa pokles (prípadne aj mierne zvýšenie) napätí oproti predchádzajúcim hodnotám sa pohyboval od 0,1 % po 2,6 %. Výnimkou boli prípady **t-10_e1-80_e2-280** a **t-12_e1-80_e2-260**.



Obr. 6 Pokles napätí pri zväčšení hrúbky skla z 10 mm na 12 mm vyjadrený v %.

Obr. 7 Pomer rozmerov e_1/e_2 .

6 ZÁVĚR

V tomto príspevku boli porovnané maximálne hlavné napätia vznikajúce na okraji otvoru v skle v závislosti od vzdialenosti skrutkového spoja od okraja a hrúbky materiálu. Napätia sa so zväčšujúcimi sa vzdialenosťami od okraja znižujú, avšak pokiaľ pomer e_1/e_2 je nízky, vo vyššie uvedených prípadoch $\leq 0,29$, zväčšovanie rozmeru e_2 môže viesť k zvyšovaniu napätia. Taktiež sa ukázalo, že pravidlá pre umiestnenie otvoru v tepelne tvrdenom skle uvedené v EN 12150 [1] za použitia skrutkového spoja namáhaného strihom a otláčením môžu byť nedostatočné a je vhodné dodržať osovú vzdialenosť bodového uchytenia od okraja minimálne 80 mm - ako je dané STN 74 3305 [2], nakoľko pri menších vzdialenostiach napätia výrazne stúpajú.

Predovšetkým je potrebná verifikácia modelu experimentom a uváženie prípadnej plastizácie hliníkovej vložky pomocou vhodného materiálového modelu a zohľadnenie vplyvu trenia medzi materiálmi. Súbor modelov by bolo taktiež vhodné rozšíriť o modely s rôznou geometriou spoja - rôzna hodnota priemeru skrutky, otvoru v skle, hrúbky vložky a medzery medzi komponentami a použiť aj materiál vložky na báze plastov.

Pod'akovanie

Táto práca vyšla s podporou grantu VEGA 1/0388/19.

Použit' zdrojje

- [1] EN 12150. Glass in building - Thermally toughened soda lime silicate glass.
- [2] STN 74 3305. Ochranné zábradlia.
- [3] MANIATIS, Iris. Numerical and Experimental Investigations on the Stress Distribution of Bolted Glass Connections under In-Plane Loads. München, 2006. Dizertačná práca. Technische Universität München.
- [4] VENCL, Radim. Analýza chování nepředepnutých šroubovaných spojů konstrukcí ze skla. Praha, 2011. Dizertačná práca. České vysoké učení technické v Praze.

PARAMETER DĚLKY NASUNUTIA NA NASÚVANÝ SPOJ

PARAMETER OF OVERLAP LENGTH ON SLIP JOINT CONNECTION

Maroš Mojto^{*,1}

*maros.mojto@stuba.sk

¹Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra kovových a drevených konštrukcií, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

Abstrakt

Nasúvaný spoj môže byť definovaný ako spoj dvoch kruhových alebo ohräňovaných oceľových rúr bez použitia zvarov alebo skrutiek. V praxi spoj nachádza uplatnenie v konštrukciách stĺpov, ktoré sa využívajú hlavne v elektrických a telekomunikačných prenosových sústavách. Príspevok uvádza význam vplyvu rôznych dĺžok nasunutia pri zaťažení ohybovým momentom. Numerický model je realizovaný pomocou modelu na princípe metódy konečných prvkov (MKP). Výsledky naznačujú, že dĺžka nasunutia je dôležitý parameter a spôsob posúdenia, tak ako je uvedený v [1] a [2], nie je vhodné používať všeobecne.

Kľúčové slova

Metóda konečných prvkov, nasúvaný spoj, napätie

Abstract

Slip joint connection can be defined as a connection of two circular or edged steel pipes without bolts or weld. In civil engineering, it is used in the construction of columns such as electrical transmission structures and telecommunication poles. The contribution presents the parameter of overlap length on slip joint connection loaded by bending moment. A numerical model is based on the finite element model (FEM). The results indicate that the effect of overlap plays a crucial role and simplified methods stated in [1] and [2] are not satisfied in general conditions.

Key words

Finite element model, slip-joint connection, stress

1 ÚVOD

Súčasná normy poskytujú iba obmedzené možnosti pri návrhu nasúvaného spoja. Jedinou požiadavkou je splnenie minimálnej dĺžky nasunutia, ktorá je definovaná ako násobok priemeru dielca (najčastejšie 1,5). Keďže takýto prístup nezohľadňuje rôzne parametre napríklad uvedené v [1], naskytuje sa otázka, či nie je takýto prístup príliš konzervatívny. Nedostatok návrhových a realizačných možností vedie k snahe objasniť správanie nasúvaného spoja.

Jeden z parametrov pri návrhu nasúvaného spoja je dĺžka nasunutia. Úlohou je zistiť veľkosť vplyvu dĺžky nasunutia a zaviesť všeobecný (zjednodušený vzťah), ktorý by tento parameter zohľadňoval.

Príspevok porovnáva jednotlivé numerické modely (MKP) s rôznou dĺžkou nasunutia. Prezenteje priebeh tangenciálneho napätia v jednotlivých rezochoch. Hlavnou úlohou je porovnanie numerických výsledkov s výsledkami zo zjednodušeného prístupu a v prípade potreby parametrizovať zjednodušený prístup. Validácia numerickej analýzy je zabezpečená pomocou experimentálneho merania.

2 POPIS SUČASNÉHO STAVU

Príspevok nadväzuje na realizovaný výskum na katedre kovových a drevených konštrukcií a to konkrétne na [2] a [3]. Taktiež vychádza zo zahraničných príspevkov a to konkrétne [4] a [5]. V rámci týchto prác je možné oboznámiť sa s uvedenou problematikou nasúvaného spoja.

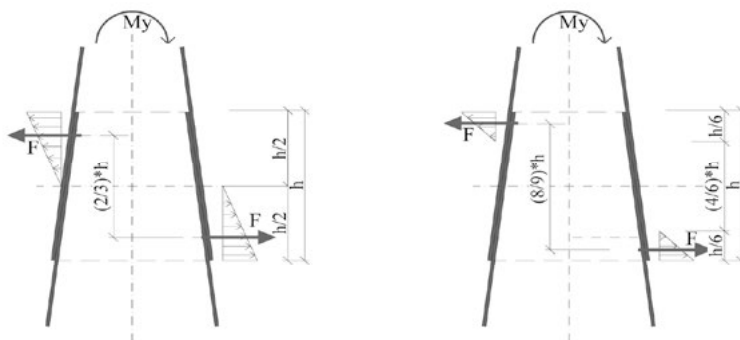
Zjednodušený prístup

Zjednodušený prístup, tak ako je uvedený v [1] a [2], najčastejšie uvádza vzťah (1) na výpočet tangenciálneho napätia. Táto situácia prezentuje predpokladanú dĺžku otláčania rovnú $0.5 \cdot h$ uvedenú na Obr. 1 na ľavej strane. Ak by sme uvažovali otláčanie napr. iba na dĺžke $1/6 \cdot h$ tak by sa výsledný vzťah upravil tak ako je uvedený (2).

$$\sigma_t = \frac{3 \cdot M_y}{t \cdot h^2} \quad (1)$$

$$\sigma_t = \frac{9.6 \cdot M_y}{2 \cdot t \cdot h^2} \quad (2)$$

kde M_y je ohybový moment v strede nasúvaného spoja, t je hrúbka steny, h je dĺžka nasunutia, σ_t je tangenciálne napätie.



Obr. 1 Na ľavej strane uvažované otláčanie $h/2$ na pravej strane uvažované otláčanie $h/6$.

3 METODIKA

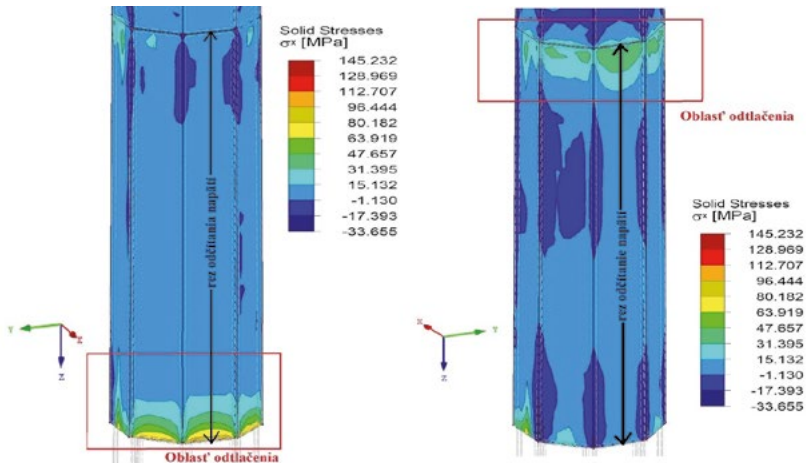
Jednotlivé modely použité na MKP analýzu sú prezentované v Tab. 1. Boli volené podľa dĺžky nasunutia od hodnoty $1.0 \cdot d$ až po hodnotu $3.0 \cdot d$. Taktiež pre každú dĺžku nasunutia sú prezentované rôzne štihlosti z dôvodu zistenia vplyvu štihlosti na takýto spoj. Najskôr boli získané tangenciálne napätia na základe zjednodušeného prístupu, predpokladajúc situáciu určenú vzťahom (1). Následne pre rovnaké okrajové podmienky bola vykonaná MKP analýza. Jednotlivé tangenciálne napätia boli medzi sebou porovnané. Na záver boli porovnané získané numerické hodnoty s experimentálnym meraním.

Tab. 1 Vstupné hodnoty do posúdenia.

model. č.	d (m)	h1 (m)	h2 (m)	h	t (mm)	c = e / t	M_y (kN*m)
1	0,3	3	3	$1 \cdot d$	3	34	25,65
2	0,3	3	3	$1 \cdot d$	10	11	25,65
3	0,3	3	3	$1 \cdot d$	10	11	85,5
4	0,3	3	3	$1 \cdot d$	2	54	17,1
5	0,3	3	3	$1,5 \cdot d$	3	34	25,65
6	0,3	3	3	$1,5 \cdot d$	10	11	25,65
7	0,3	3	3	$2 \cdot d$	3	34	25,65
8	0,3	3	3	$2 \cdot d$	10	11	25,65
9	0,3	3	3	$3 \cdot d$	3	34	25,65
10	0,3	3	3	$3 \cdot d$	10	11	25,65
11 experiment	0,122	2,21	2,21	$3,1 \cdot d$	3	15	3,03

MKP model

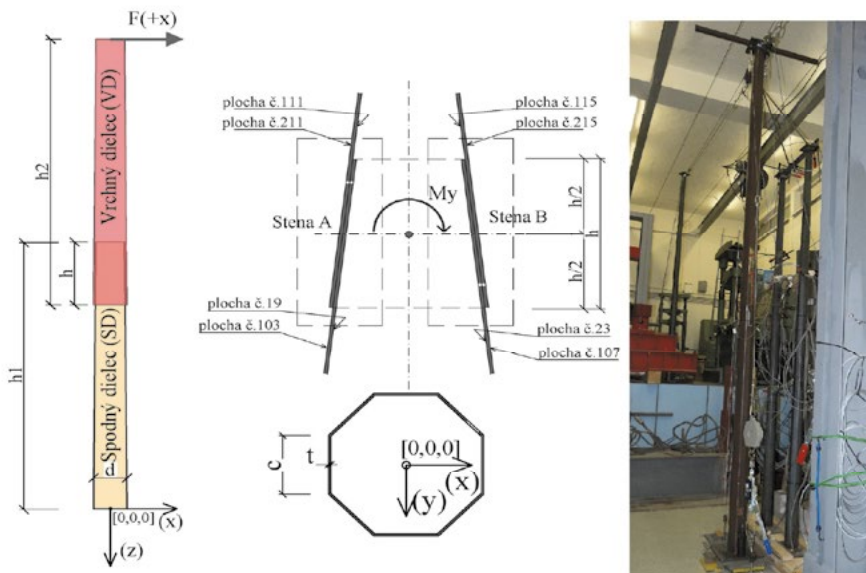
Numerická analýza pre jednotlivé modely bola realizovaná metódou konečných prvkov v softvéri Dlubal Rfem 5.20. Kontaktná plocha medzi horným a spodným dielcom je účinná iba v tlaku so súčiniteľom trenia 0,3. Veľkosť elementov v mieste spoja je 5 mm. Riešenie rovníc bolo riešené pomocou Modifikovanej Newton – Raphsonovej metódy.



Obr. 2 Pribeh tangenciálneho napätia: na ľavej strane otláčenie v hornej časti (plocha č. 211) na pravej strane otláčenie v spodnej časti (plocha č. 215).

Experimentálny model

Popis experimentálneho merania (spôsob zaťaženia, meracia technika, vzorka) je uvedený v [6].



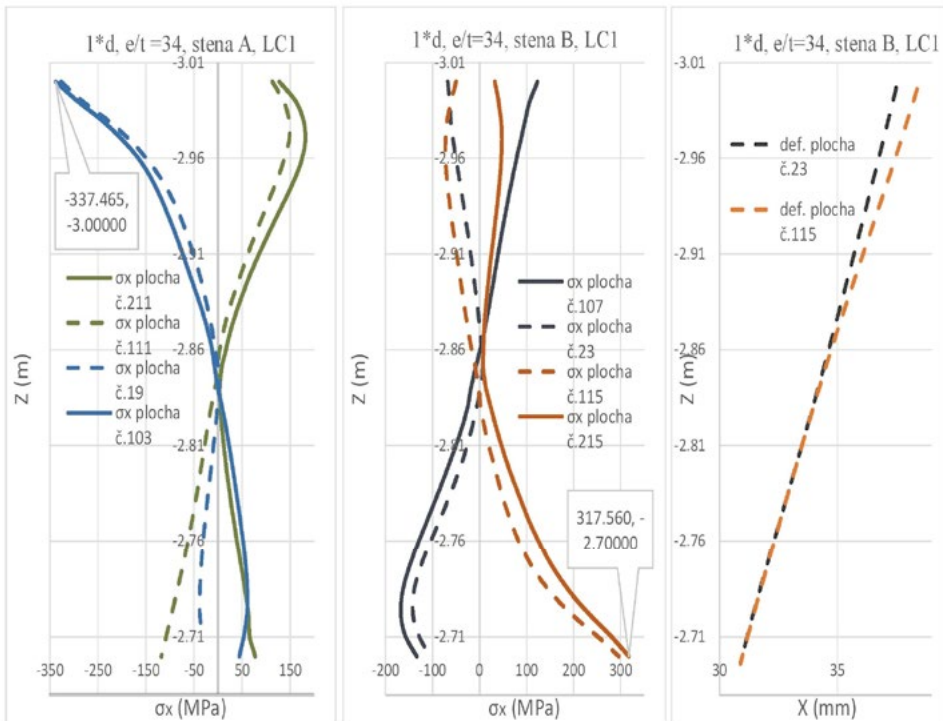
Obr. 3 Na ľavej strane schéma usporiadania na pravej strane experimentálny model v laboratóriu.

4 VÝSLEDKY

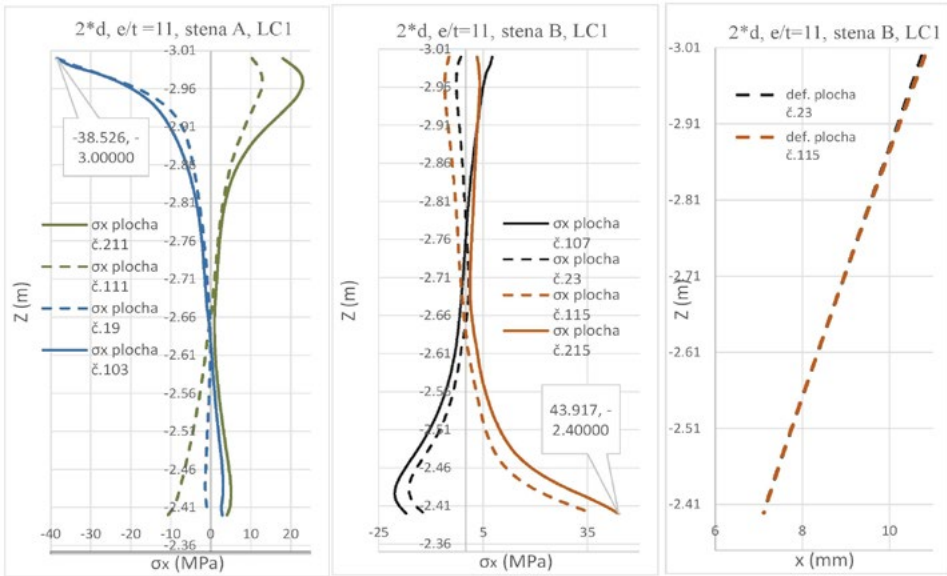
Výsledky pre jednotlivé riešenia sú uvedené v Tab. 2. V stĺpci označenom ako K je uvedený parameter, ktorý vstupuje do Obr. 6 na pravej strane. Tento parameter je vypočítaný na základe dĺžky otláčenia uvedeného v Tab. 2 podľa zjednodušeného prístupu prezentovaného vzťahom (1). Výsledný vzťah s parametrom K je prezentovaný ako (3). Hodnota tangenciálneho napätia uvedená ako σ_x zodpovedá už skôr použitému označeniu σ_t .

Tab. 2 Výsledky pre jednotlivé modely.

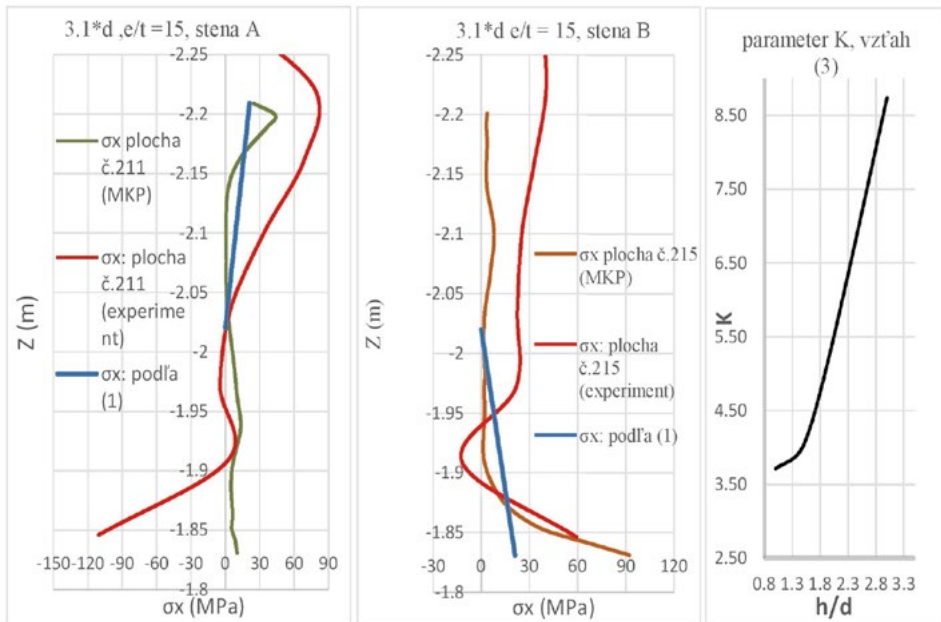
model č.	σ_x (MPa) podľa (1)	σ_x (MKP) max. záporné	σ_x (MKP) max. kladné	dĺžka otláčenia (MKP)	násobok: (dĺžka otlačenia / h)	K
1	285	-337	317	105	0,35	3,73
2	85,5	-108	105	107	0,36	3,66
3	285	-359	350	107	0,36	3,66
4	285	-330	314	103	0,34	3,8
5	126,7	-183	176	133	0,30	4,17
6	38	-55	58	148	0,33	3,89
7	71,25	-135	135	120	0,2	5,77
8	21,4	-38	44	147	0,24	4,96
9	31,7	-106	117	106	0,12	9,06
10	9,5	-29	40	115	0,13	8,42
11 experiment	21	-	90	55	0,14	7,682



Obr. 4 Výsledky pre dĺžku nasunutia $1 \cdot d$. Z ľavej strany: priebeh tangenciálneho napätia na stene A, priebeh tangenciálneho napätia na stene B, deformácia.



Obr. 5 Výsledky pre dĺžku nasutia $2 \cdot d$. Z ľavej strany: priebeh tangenciálneho napätia na stene A, priebeh tangenciálneho napätia na stene B, deformácia.



Obr. 6 Na ľavej strane a v strede porovnanie experimentálneho merania, MKP a metódy podľa (1). Na pravej strane závislosť medzi dĺžkou nasutia a parametrom K.

Na základe dosiahnutých výsledkov bola vytvorené krivka (závislosť medzi dĺžkou nasutia a parametrom K) vid' na Obr. 6 na pravej strane.

$$\sigma_t = K * \frac{M_y}{t * h^2} \quad (3)$$

5 DISKUSIA

Maximálna hodnota tangenciálneho napätia sa nachádza vždy v oblasti konca dielca, čo sa dá vysvetliť tým, že tuhosť v tomto mieste je nižšia.

V oblasti plynulého prechodu dielca nie je maximálne napätie na okraji ale kúsok nižšie. Dôvod takéhoto správania bude pravdepodobne potrebné bližšie objasniť. Jedným z dôvodov môže byť vzájomné posunutie jednotlivých dielcov a teda akoby časť dielca už nebola otláčaná. V tomto prípade je vzájomné posunutie iba niekoľko milimetrov, zatiaľ čo maximálna hodnota napätia je až niekoľko centimetrov od hrany spoja.

Ako ďalšia zaujímavosť je samotné porovnanie maximálnych priebehov napätí na stenách 103 a 215. Zaujímavé je to, že pri 103 sa postupne zo zápornej hodnoty dostaneme do kladnej, zatiaľ čo pri 215 ostáva stále iba v kladnej hodnote.

Z výsledkov je taktiež vidieť, že štíhlosť môže mať určitý vplyv. Je to vidieť na tom, ako sa vzdávajú jednotlivé hodnoty tangenciálneho napätia na stenách 115 a 215 zobrazené na Obr. 5. Dá sa konštatovať, že prierez s nižšou štíhlosťou je významnejšie ovplyvnený ohybovým momentom.

Na základe prezentovaných experimentálnych výsledkov sa dá konštatovať z určitej časti správnosť dosiahnutých numerických výsledkov. Za správnosť v tomto prípade je považované to, že tvar priebehu napätia získaného z experimentálneho modelu je podobný s numerickým priebehom. Je potrebné ale poznamenať, že veľkosť jednotlivých hodnôt je v niektorých prípadoch výrazne odlišná. Tento jav sa pripisuje vnesenému predpätiu pri montáži. Objasnenie vplyvu montáže na merané hodnoty je cieľom ďalšieho výskumu.

6 ZÁVER

Možno konštatovať, že vplyv dĺžky nasunutia má významný vplyv na návrh nasúvaného spoja a posúdenie pomocou zjednodušeného prístupu je nutné parametrom dĺžky nasunutia opraviť. Toto konštatovanie je dokázané na Obr. 6, kde je vidieť zásadný rozdiel medzi zjednodušeným prístupom podľa (1) a numerickým, prípadne experimentálnym modelom. Rozdiel medzi zjednodušeným a numerickým modelom je v tomto prípade až trojnásobný. Avšak v tom prípade treba uviesť, že sa jedná o extrémnu hodnotu násobku nasunutia $3.1 * d$ (bežne sa nepoužíva). Veľkosť vplyvu pre iné dĺžky nasunutia je možné vidieť porovnaním hodnôt parametrov K uvedených v Tab. 2 s hodnotou $K = 3$ platnou pre vzťah (1). A teda aj druhá časť úlohy, zavedenie parametra nasunutia K do zjednodušeného posúdenia, bola splnená a je prezentovaná pomocou vzťahu (3). Za prínos sa dá tiež považovať aj zistenie, že štíhlosť prierezov má vplyv na návrh spoja a to bude cieľom ďalšieho skúmania.

Použitá zdroje

- [1] SLOCUM, R. and FAIRBAIRN, M.: Slip Joints Connections – How Do These Things Work? In: Electrical transmission and substation structures. Branson, Missouri, 2015. p. 363-374. ISBN 978-0-7844-7941-4.
- [2] BOTLÓ, M.: Nasúvané spoje ohraňovaných stožiarov. Dizertačná práca 2017. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, s. 40-44. Evidenčné číslo SvF-13420-50559.
- [3] RECKÝ, J.: Teoretické a konštrukčné problémy oceľových stožiarov. Dizertačná práca 2012. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave. Evidenčné číslo SvF-10935-4286.
- [4] SEGEREN, MLA and HERMANS, KW.: Experimental investigation of the dynamic installation of a slip joint connection between the monopile and tower of an offshore wind turbine. Journal of Physics: Conference Series, 524 (1), 2014; TORQUE 2014: The Science of Making Torque from Wind 2014, Copenhagen, Denmark, 18-20 June 2014
- [5] van der TEMPEL, J. and SCHIPHOLT, B. L.: The Slip-Joint Connection Alternative connection between pile and tower. Dutch Offshore Wind Energy Converter project. Delft University of Technology, 2003. DOWEC report - F1W2-JvdT-03-093/01-P
- [6] BRODNIANSKY, J. – BRODNIANSKY (Prof.), J. – KLAS, T. – MAGURA, M. - RECKÝ, J.: Laboratórna skúška nasúvaného spoja na 8-hrannej rúre. V: 44. Aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií. Košice : TU Košice SvF, 2019. s. 15-22. ISBN 978-80-553-3388-5.

ANALÝZA TEPLOTNÝCH POLÍ PRI ZVÁRANÍ OCEĽOVÝCH KONŠTRUKCIÍ

ANALYSIS OF TEMPERATURE FIELDS DURING WELDING OF STEEL STRUCTURES

Adam Petřík^{*,1}

*adam.petrik@stuba.sk

¹Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra kovových a drevených konštrukcií, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

Abstrakt

Proces zvárania patrí medzi jeden z možných spôsobov zhotovovania oceľových konštrukcií a ich detailov. Sprievodným javom tohoto procesu je vystavenie okolia miesta zvárania vysokej teplote, ktorá okrem vzniku viacerých negatívnych fenoménov môže často spôsobovať poškodenie alebo znehodnotenie materiálov umiestnených v blízkosti oblasti zvárania v styku s oceľovými prvkami. Tieto vplyvy je možné čiastočne korigovať zmenou merného tepelného príkonu. Pomocou numerických simulácií je možné analyzovať teplotné polia počas zvárania, vplyv okolitých materiálov na zmenu teploty na oceľových plochách a tým predchádzať negatívnym vplyvom zvýšenej teploty.

Kľúčové slová

Oceľové konštrukcie, zváranie, teplota, izoplochy

Abstract

The welding process is one of the possible ways of fabricating steel structures and details. The accompanying phenomenon of this process is the exposure of the surroundings of the welding areas to high temperatures, which in addition to the occurrence of several negative phenomena can often cause damage or deterioration of materials located near the welding area in contact with steel elements. These effects can be partially corrected by changing the heat input. Using numerical simulations, it is possible to analyse temperature fields during welding, the influence of surrounding materials on the change in temperature on steel surfaces and thus prevent the negative effects of elevated temperature.

Key words

Steel structures, welding, temperature, isosurfaces

1 ÚVOD

Stavebné konštrukcie s nosným konštrukčným systémom z ocele patria medzi obľúbené ako v pozemnom, tak aj v mostnom staviteľstve, kde sa často ich komponenty spájajú zváraním. Najmä v mostnom staviteľstve sú vplyvom prevádzky a klimatických vplyvov zvaru vystavené nepriaznivým účinkom a môže dôjsť k ich porušeniu, čo negatívne ovplyvňuje bezpečnosť a spoľahlivosť konštrukcie a je nutné takéto poruchy opravovať.

Rozbor procesu zvárania z hľadiska teploty je dôležitý najmä z dôvodu analýzy oblasti ovplyvnenej teplom (HAZ - heat affected zone), ako aj kvôli vzniku reziduálnych napätí - obe patria medzi negatívne faktory tejto metódy spájania oceľových prvkov. Rovnako dôležité je teplotnú analýzu vykonať aj v prípade sanácie poškodených zvarov, kde sa vplyvom veľkej teploty v oceľových prvkoch môže poškodiť materiál v styku s oceľou. Tieto materiály často výrazne ovplyvňujú rozloženie teplotných polí v skúmanej časti, nakoľko sa môžu správať buď ako tepelný vodič, alebo ako tepelný izolant. Často sa v predmetných detailoch zvarom pripája viacero prvkov, ktoré sa taktiež podieľajú na vedení tepla.

Ozrejmiť vedenie tepla vplyvom zvárania a predchádzať prípadným poškodeniam okolitých materiálov je možné prostredníctvom teplotnej analýzy s korektným zohľadnením všetkých okrajových podmienok, ktorej výsledkom sú teplotné polia počas celého procesu zvárania. Na základe výsledkov numerických analýz je možné modifikovať rýchlosť zvárania tak, aby nedochádzalo k poškodeniam.

Príspevok analyzuje možnosť využitia teplotnej analýzy procesu zvarovania v konečnoprvkovom softvéri pre rôzne okrajové podmienky na konkrétnom prípade sanácie zvaru výstuhu k plechu mostovky.

2 TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ PROBLEMATIKY

Pri analýze teplotných polí je potrebné poznať materiálové charakteristiky jednotlivých prvkov, a to najmä hustotu materiálu, merné teplo, teplotnú závislosť modulu pružnosti či súčinitele tepelnej vodivosti, lineárnej teplotnej rozťažnosti.

V súčasnosti je možné využiť viacero možných typov numerických simulácií procesu zvarovania - v tomto príspevku proces zvarovania analyzovaný prostredníctvom simulácií pri ktorých je analyzovaný vplyv parametrov prvkov a zvarovania (merný tepelný príkon, hrúbky prvkov, sekvencia zvarovania a pod) [1,2]. V tomto prípade je možné optimalizovať jednotlivé parametre ešte pred zhotovením zvaru, respektíve pred jeho sanáciou.

V prípade sanácií zvarov často nie je možné ovplyvňovať hrúbky prvkov, a preto je nutné prispôsobiť merný tepelný príkon konkrétnej situácii - aj z hľadiska vzniku reziduálnych napätí, ale aj kvôli ochrane okolitých materiálov v styku s oceľovou konštrukciou. Ten môžeme definovať ako množstvo tepelnej energie spotrebovanej na vytvorenie jednotkovej dĺžky jednovrstvého zvarového spoja. Vypočíta sa podľa vzťahu [3]:

$$Q = \frac{k \cdot U \cdot I}{V} 10^{-3} \quad (1)$$

kde Q je merný tepelný príkon (kJ/mm), k je súčiniteľ tepelnej účinnosti zvaracieho procesu (-), U je zvaracie napätie (V), I je zvarací prúd (A) a V je rýchlosť zvarovania (mm/s).

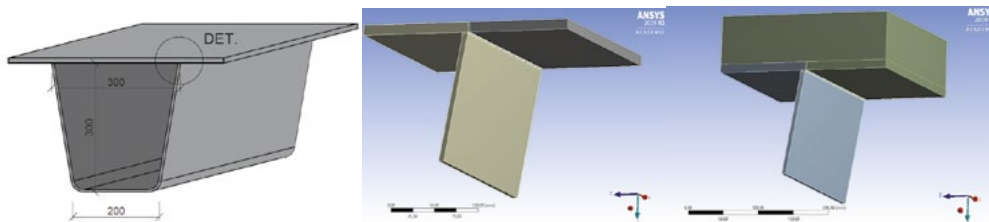
Z rovnice je jasné, že v prípade nutnosti použitia konkrétneho zvaracieho prúdu a napätia je možné ovplyvniť hodnotu merného tepelného príkonu zmenou rýchlosti vyhotovovania zvaru, pričom platí že čím väčšia je rýchlosť zvarovania, tým nižšie teploty bude okolie zvaru dosahovať.

Na základe týchto predpokladov vyplýva, že proces zvarovania je z tepelne-fyzikálneho hľadiska možné interpretovať ako pohybujúci sa zdroj tepla, ktorého výsledkom je nestacionárne teplotné pole, ktorého tvar závisí okrem veľkosti merného tepelného príkonu aj od hodnoty tepelnej vodivosti základného materiálu, hrúbky materiálu či teploty materiálu pri zvaraní. Príkladom je závislosť medzi hodnotou tepelnej vodivosti a šírkou teplotného poľa - s vyššou hodnotou tepelnej vodivosti rastie šírka teplotného poľa. Taktiež platí predpoklad, že v prípade tenších plechov (hrúbka do 10 mm) je možné považovať priebeh teplôt po hrúbke za konštantný [3].

3 NUMERICKÁ ANALÝZA

Teplotná analýza procesu zvarovania výstuhu k plechu mostovky bola vykonaná v softvéri ANSYS [4]. Prvý krok analýzy spočíval vo vytvorení 3D modelu prípoja výstuhu (hrúbka 6 milimetrov) k plechu mostovky (hrúbka 12mm) v dvoch variantoch - v prípade prvého bola z jednej strany plechu mostovky privarovaná výstuha, pričom druhá strana bola v kontakte s okolitým vzduchom; v druhom prípade bola táto strana plechu mostovky v kontakte so 70 milimetrovou vrstvou liateho asfaltu (zobrazené na obr.1). Z dôvodu úspory výpočtového času a aj z dôvodu sanácie len jednej strany prípoja výstuhu na plech je modelovaná len polovica výstuhu s príslušnou časťou plechu mostovky.

Po vložení geometrie boli do softvéru ANSYS vložené aj požadované materiálové charakteristiky ocele (objemová hmotnosť 7850 kg/m³; hodnota tepelnej vodivosti a merného tepla podľa EN 1993-1-2[5]) a asfaltu (objemová hmotnosť 2400 kg/m³; hodnota tepelnej vodivosti 0,7 W/m.K a hodnota merného tepla 1010 J/kg.K).

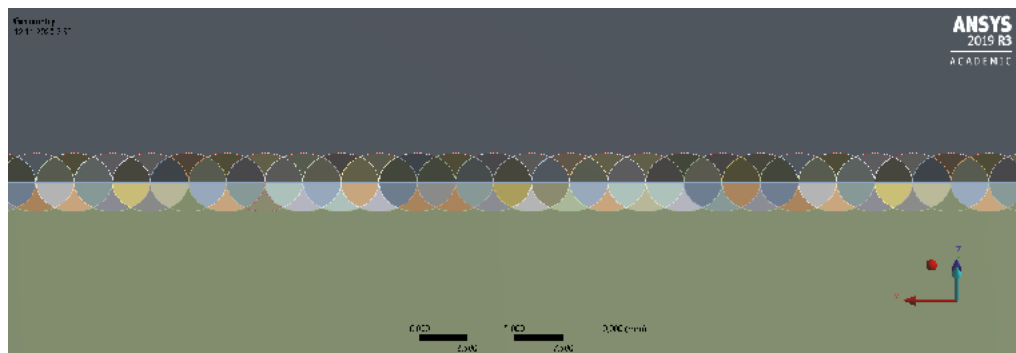


Obr. 1 Schéma pripojenia výstuhu na plech mostovky (vľavo); model detailu prípoja výstuhu na plech mostovky bez asfaltu (uprostred); model detailu prípoja výstuhu na plech mostovky s asfaltom (vpravo).

Zaťaženie teplotou bolo modelované prostredníctvom funkcionality tepelného toku, kde bola vložená hodnota tepelnej energie zo zvárania, čo je ekvivalentné čitateľu vzťahu (1). Hodnota zväracieho napätia bola stanovená na hodnotu 20 V a hodnota zväracieho prúdu 80 A, súčiniteľ tepelnej účinnosti zväracieho procesu na hodnotu 0,8 (podľa EN 1011 pre ručné oblúkové zváranie [6]). To predstavuje hodnotu tepelného príkonu 1,28 kW. Ten bol aplikovaný na plochu o priemere 4 milimetre, čo predstavuje priemer zdroja.

Rýchlosť zvárania bola stanovená v intervale 1 až 4 milimetre za sekundu, čo podľa vzťahu (1) predstavuje merný tepelný príkon v intervale 0,32 kJ/mm až 1,28 kJ/mm. Samotný pohyb a jeho rýchlosť bola zohľadnená softvérom prostredníctvom polohy tepelného zaťaženia a časovým intervalom medzi jednotlivými krokmi tepelného zaťaženia - tých bolo celkovo 80 v prípade každého modelu, čo malo predstavovať plynulý a dostatočne dlhý pohyb tepelného zaťaženia z procesu zvárania.

Taktiež bola definovaná radiácia prostredníctvom emisie tepelného žiarenia z ocele (prípadne aj z asfaltu) do okolia, ktorého teplota bola stanovená na hodnotu 22°C. Súčiniteľ emisivity bol stanovený v prípade ocele na hodnotu 0,7 a v prípade asfaltu na 0,93.



Obr. 2 Trajektória simulácie procesu zvárania zostavená z kruhových plôch o priemere 4 milimetre.

4 VÝSLEDKY NUMERICKÝCH SIMULÁCIÍ

Po zadaní všetkých vstupov do softvéru ANSYS bol spustený výpočet pre každú z rýchlostí a pre obe návrhové situácie - s asfaltom aj bez asfaltu. Tepelné polia boli analyzované na každom z povrchov oceľovej konštrukcie. Komplexné výsledky sú uvedené v tabuľke č. 1

Tab. 1 Výsledky z numerických modelov.

Typ modelu	Model bez asfaltu				Model s asfaltom			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Rýchlosť [mm/s]								
Merný tepelný tok [kJ/mm]	1,28	0,64	0,43	0,32	1,28	0,64	0,43	0,32
<i>Teplotné polia na plechu mostovky a výstuhe na strane sanácie zvaru</i>								
Tep. pole 250°C - šír. [mm]	32,49	20,25	16,91	13,43	30,54	20,04	16,95	13,51
Tep. pole 250°C - dĺž. [mm]	52,06	35,67	30,62	24,31	43,21	31,33	27,29	23,24
Tep. pole 500°C - šír. [mm]	13,65	10,11	9,05	7,81	13,59	10,50	9,44	8,29
Tep. pole 500°C - dĺž. [mm]	18,21	15,3	14,30	13,52	15,65	12,95	12,41	11,49
Tep. pole 1000°C - šír. [mm]	7,33	6,15	5,95	5,71	7,25	6,67	6,40	5,92
Tep. pole 1000°C - dĺž. [mm]	9,56	8,59	8,04	7,43	8,23	7,28	7,00	6,53
Tep. pole 1500°C - šír. [mm]	5,56	4,85	4,61	4,26	6,08	5,52	5,16	4,7
Tep. pole 1500°C - dĺž. [mm]	6,52	5,66	4,94	4,41	6,07	5,28	5,14	4,75
Tep. pole 2000°C - šír. [mm]	4,63	4,19	4,10	3,95	5,11	4,51	4,18	3,7
Tep. pole 2000°C - dĺž. [mm]	4,54	4,12	4,01	3,78	4,75	4,20	4,02	3,43
Max. teplota [°C]	4128,7	3824,8	3707,5	3518,5	4304,5	3889,9	3669,3	3336,9

Teplotné polia na plechu mostovky a výstuhe na opačnej strane sanácie zvaru

Tep. pole 250°C - šír. [mm]	26,01	15,18	11,37	6,95	23,91	13,1	10,01	6,41
Tep. pole 250°C - dĺž. [mm]	49,32	30,94	25,35	19,65	43,25	28,77	23,95	17,48
Tep. pole 500°C - šír. [mm]	6,48	1,68	-	-	6,26	-	-	-
Tep. pole 500°C - dĺž. [mm]	11,82	4,30	-	-	11,31	-	-	-
Max. teplota [°C]	779,06	575,92	495,29	377,8	654,04	479,63	418,73	335,91

Teplotné polia na plechu mostovky na jeho hornej strane (prípadne strane v kontakte s asfaltom)

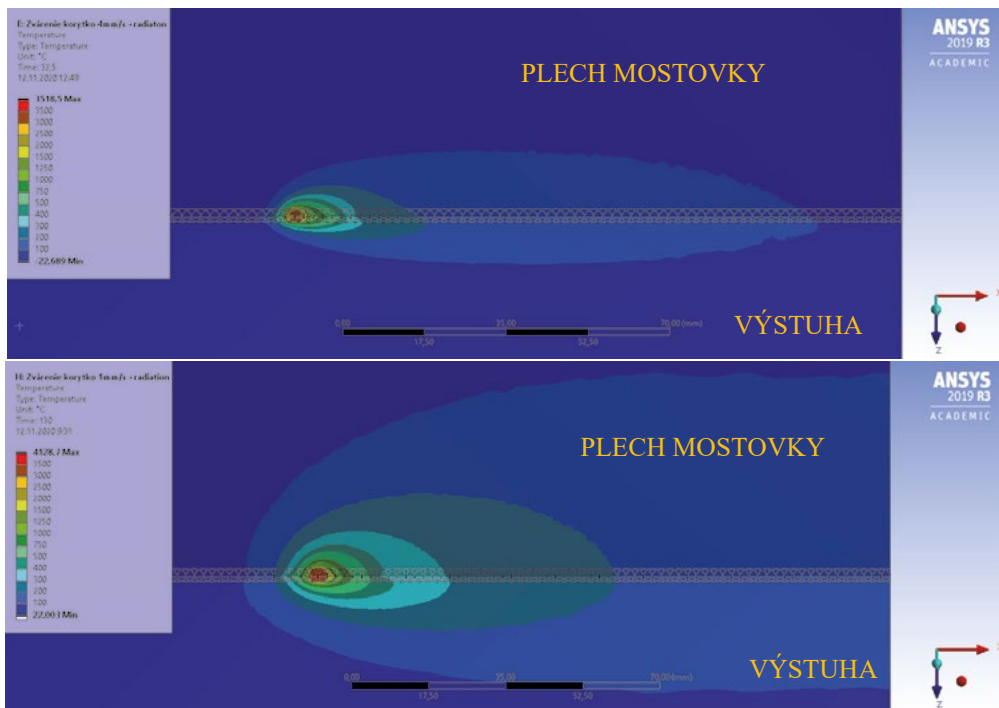
Tep. pole 100°C - šír. [mm]	100,08	57,56	44,89	30,8	77,59	50,55	39,80	28,47
Tep. pole 100°C - dĺž. [mm]	146,31*	136,6*	133,2*	107,98	128,48	107,63	98,12	83,81
Tep. pole 200°C - šír. [mm]	41,18	19,86	11,95	-	34,09	16,98	8,46	-
Tep. pole 200°C - dĺž. [mm]	74,38	40,25	24,73	-	56,21	30,92	16,32	-
Tep. pole 300°C - šír. [mm]	19,58	-	-	-	14,64	-	-	-
Tep. pole 300°C - dĺž. [mm]	29,56	-	-	-	22,17	-	-	-
Max. teplota [°C]**	397,66	278,91	234,16	178,4	359,4	254,55	216,45	169,4

* Teplotné pole končí na hrane oceľového prvku.

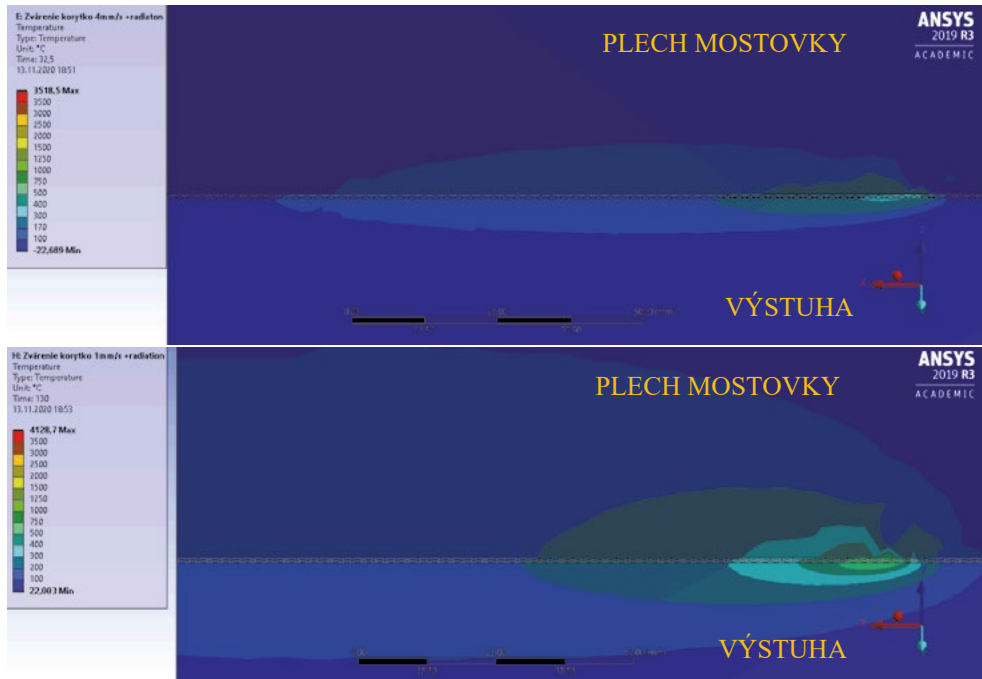
** Teplota je totožná v kontakte ako pre oceľový povrch, tak aj asfaltový.

Jednotlivé teplotné polia boli vykreslené na všetkých povrchoch výstuhy a plechu mostovky po 65 krokoch výpočtu, čo predstavuje dostatočne dlhú simuláciu pohybu elektródy (v numerickom modeli pohyb tepelnej energie) po povrchu plechu mostovky a výstuhy.

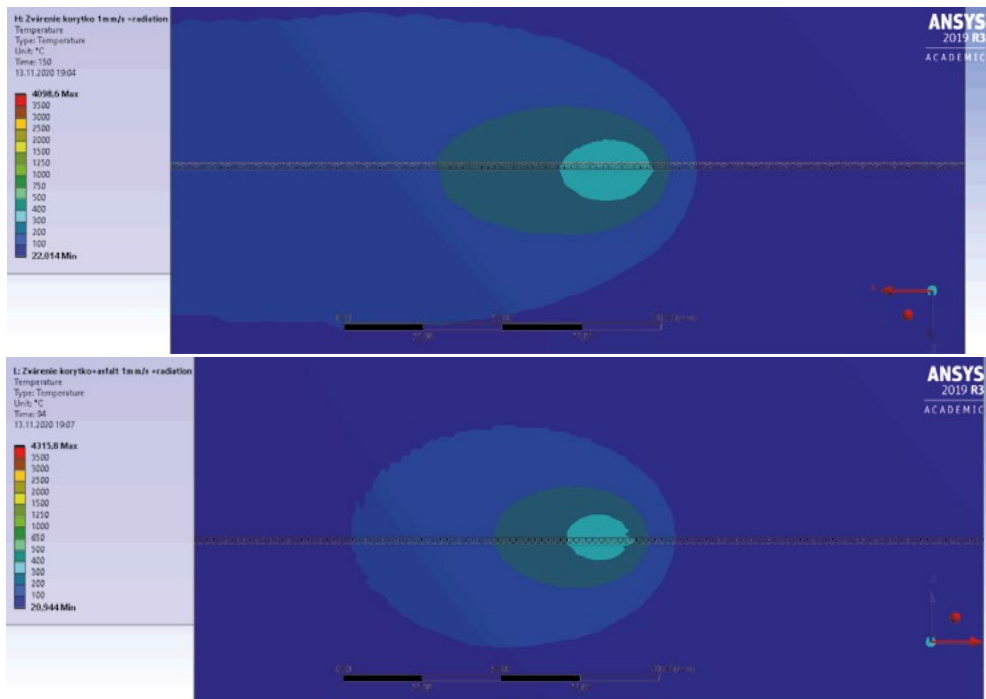
Niektoré teplotné polia pre vybrané rýchlosti procesu zvarovania sú zobrazené na obr. 3 až 5.



Obr. 3 Teplotné polia na strane sanácie zvaru výstuhy k plechu mostovky (pohľad zvonku pozdĺžnej výstuhy; modely bez asfaltu) - rýchlosť 4 mm/s (hore); rýchlosť 1mm/s (dole).



Obr. 4 Teplotné polia na opačnej strane sanácie zvaru výstuhu k plechu mostovky (pohľad zvnútra pozdĺžnej výstuhu; modely bez asfaltu) - rýchlosť 4 mm/s (hore); rýchlosť 1mm/s (dole).



Obr. 5 Teplotné polia na hornej strane plechu mostovky (pohľad zhora na plech mostovky; rýchlosť 1 mm/s) – bez asfaltu (hore); v styku s asfaltom (dole).

5 DISKUSIA

Z výsledkov uvedených v tabuľke č.1 je zrejmé, že so zväčšujúcou sa rýchlosťou zvárania (t.j. so znižujúcou sa hodnotou merného tepelného príkonu) sa znižuje veľkosť (šírka a dĺžka) jednotlivých tepelných polí. V prípade detailu prípoja výstuhy k plechu mostovky je teplota a veľkosť jednotlivých tepelných polí závislá aj na orientácii pohľadu na detail - teplotné polia s vyššou hodnotou sú prirodzene na strane, kde dochádza k zváraniu, nižšie teploty na povrchu oceľových prvkov sú na odvrátených stranách.

Vplyv asfaltu na veľkosť teploty a veľkosť tepelných polí sa prejavil vo forme na čiastočnom ochladzovaní horného povrchu plechu mostovky, ktorý je vo styku s asfaltom. Veľkosti tepelných polí sú menšie v modeloch s asfaltom v porovnaní s modelmi bez asfaltu. Tento teplotný rozdiel je závislý od rýchlosti zvárania, pričom so zvyšujúcou sa rýchlosťou klesá teplotný rozdiel.

Teplotná špička v mieste pôsobenia tepelnej energie nepredstavuje realitu, nakoľko tepelná energia nepôsobí na preponu zvaru, ale na povrch plechu mostovky a výstuhy na ploche, ktorá predstavuje priemer zdroja.

6 ZÁVER

Potvrdilo sa, že analýza procesu zvárania je dôležitá nielen z hľadiska reziduálnych napätí ale aj kvôli určeniu teplôt na jednotlivých povrchoch oceľových prvkov v okolí zvaru. Majoritný vplyv na to má merný tepelný príkon, ktorý predstavuje tepelnú energiu, ktorá sa pri procese zvárania odovzdáva do konštrukcie. Tento príkon je možné čiastočne modifikovať zmenou zväčšujúceho napätia a prúdu, no často aj jednoduchšou metódou, a to zmenou rýchlosti zvárania, pričom zvýšením rýchlosti sa znižuje tepelný príkon a tým pádom aj teplota v okolí zvaru.

Vyššie uvedená numerická analýza navyše potvrdila, že vplyv na šírenie teploty majú aj materiály v kontakte s týmito prvkami v okolí zvaru, nakoľko sa taktiež podieľajú na vedení tepla. V tomto prípade asfaltová vrstva ochladzuje horný povrch plechu mostovky a v menšej miere sa podieľa aj na znižovaní veľkosti tepelných polí v ostatných častiach skúmaného detailu.

Tepelný výpočet uvedený v tomto príspevku je možné využiť v ďalšej fáze analýzy konštrukcii, kde na základe teplôt v okolí zvaru je možné analyzovať reziduálne napätia a deformácie vplyvom zvýšenej teploty od zvárania.

Podakovanie

Tento článok bol podporený Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied – grant VEGA 1/0773/18.

Použité zdroje

- [1] Bhatti, A. et al.: Influence of thermo-mechanical material properties of different steel grades on welding residual stresses and angular distortion. *Materials and Design*, 65, 2015, pp. 878-889
- [2] Meško, J. - Zrak, A. - Nigrovič, R.: Effect of Cutting Speed by Laser on Thickness of Heat Affected Zone of Mild Steel S235, *Advanced manufacturing and repair technologies in vehicle industry: 32th international colloquium*, Pardubice, Czech Republic, 2015, pp. 99-104.
- [3] Napätia a deformácie zo zvárania, <http://www.histproject.no/> [online]. [cit. 14.12.2020] Dostupné z: <https://readgur.com/doc/197423/3-nap%C3%A4tia-a-deform%C3%A1cie-zo-zv%C3%A1rania>
- [4] Software ANSYS 2019: User's Manual, Available on the internet: <<https://ansyshelp.ansys.com>>
- [5] Eurokód 3: Navrhovanie oceľových konštrukcií. Časť 1-2: Všeobecné pravidlá. Navrhovanie konštrukcií na účinky požiaru
- [6] STN EN 1011-1: Zváranie. Odporúčania na zváranie kovových materiálov. Časť 1: Všeobecný návod na oblúkové zváranie

LIMITA VZPĚRNÉ PEVNOSTI OCELOVÝCH TRUBEK VYPLNĚNÝCH BETONEM PŘI POUŽITÍ MATERIÁLŮ VYSOKÝCH PEVNOSTÍ

LIMIT OF THE BUCKLING STRENGTH OF CONCRETE FILLED STEEL TUBES WHEN USING HIGH STRENGTH MATERIALS

Pavla Bukovská^{*,1}

* bukovska.p@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav kovových a dřevěných konstrukcí, Veverčí, 331/95, Brno, 602 00

Abstrakt

Článek je zaměřen na používání materiálů vyšších pevností u sloupů z ocelových kruhových trubek vyplněných betonem. Výsledky experimentálních analýz naznačují, že při použití betonu vyšší pevnosti roste vzpěrná únosnost sloupu, ale její přírůstek klesá. Článek je věnován teoretické studii průběhu vzpěrné pevnosti v závislosti na pevnosti použitých materiálů (betonu a oceli). Cílem je analyzovat výsledky získané aktuálně platným normativním postupem výpočtu vzpěrné pevnosti pro materiály velmi vysokých pevností.

Klíčová slova

Vzpěrná pevnost, trubky vyplněné betonem, globální stabilita, beton vysoké pevnosti, osový tlak

Abstract

The paper focuses on the use of higher strength materials for columns made of steel circular tubes filled with concrete. The results of experimental analyses suggest that when using higher strength concrete, the buckling capacity of the column increases, but its increment decreases. The paper deals with a theoretical study of a development of buckling strength depending on the strength of the materials used (concrete and steel). The aim is to analyse the results obtained by the currently valid normative procedure for calculating the buckling strength for materials of very high strength.

Key words

Buckling resistance, concrete filled steel tubes, global stability, high strength concrete, axial compression

1 ÚVOD

Práce je součástí výzkumného programu v oblasti používání materiálů vysokých pevností u stavebních prvků tvořených ocelovou trubkou vyplněnou betonem (CFST - concrete filled steel tubes). Pozornost je věnována otázkám efektivity použití betonu vyšší pevnosti. V rámci první experimentální části programu bylo sledováno chování ocelových trubek vyplněných betonem při namáhání centrickým tlakem s vlivem vzpěru. Z výsledků souboru testovaných těles vyplývá, že použití betonu vyšší pevnosti nepřináší u trubky vyplněné betonem efektivní zvýšení vzpěrné únosnosti. Následná teoretická studie potvrdila, že i pro jiné uspořádání kruhových průřezů se efektivita zvyšování pevnosti betonu projevuje jen do určité míry [1].

Otázkou je, zda má tedy konkrétně u kompozitních prvků typu CFST smysl používat pro výplň beton o stále vyšší pevnosti. S tím souvisí i použití oceli vyšších pevností. Cílem článku je vytvoření představy o vývoji vzpěrné pevnosti sloupu při použití ultra-pevných materiálů. V článku je provedena teoretická studie, která hledá limity vzpěrné pevnosti CFST v závislosti na pevnosti použitých materiálů.

V rámci studie jsou uváděny charakteristické hodnoty pevnosti, které odpovídají průměrným hodnotám a lépe vystihují očekávanou odezvu skutečné konstrukce. Výpočet vzpěrné pevnosti je proveden podle metody uvedené v normě ČSN EN 1994-1-1 [2]. Na základě [3] lze tuto normu zjednodušeně uplatnit i pro navrhování trubek vyplněných betonem z materiálů vyšších pevností.

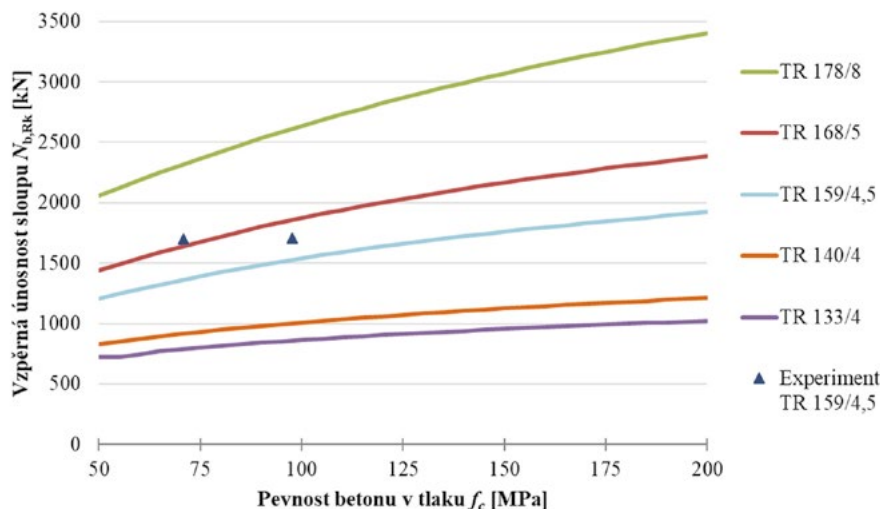
2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Trubky vyplněné betonem představují kompozitní stavební prvky vhodné pro použití při tlaku, ohybu nebo kombinaci těchto dvou namáhání. Spojení ocelové trubky a betonové výplně je výhodné pro oba materiály jak z hlediska jejich odezvy na zatížení, tak také z konstrukčního hlediska. Tvar CFST je dán průřezem ocelové trubky a může být čtyřhranný nebo kruhový. V tomto článku je pozornost věnována výhradně kruhovému průřezu. Sloupy kruhového průřezu vykazují lepší chování při zatížení [4]. Z hlediska výroby sloupů je kruhový průřez výhodnější, neboť u čtyřhranných průřezů hrozí nevyplnění rohů betonem.

V současné době vede tendence minimalizovat spotřebu materiálu k důrazu na zvyšování pevnosti materiálu. Vyloučením hrubého kameniva, zlepšením hustoty náplně použitím prášků se specifickým rozdělením velikosti zrn a použitím vytvrzování vodou nebo párou při 90 °C je možné zvýšit pevnost betonu v tlaku na více než 200 MPa při použití minerálních prášků. Při použití skleněného prášku je možné dosáhnout pevnosti betonu 270 MPa a při použití železného prášku až 800 MPa [5].

Použití betonu vyšší pevnosti v CFST však nepřináší očekávané zlepšení únosnosti, protože zvýšení pevnosti vede k návrhu štíhlejších prvků. Čím vyšší štíhlost, tím vyšší riziko globální ztráty stability, kde nerozhoduje pevnost, ale modul pružnosti. Efektivita zvyšování pevnosti betonu se projevuje jen do určité míry [6]. Tato skutečnost byla potvrzena i v [7]. V provedených experimentálních analýzách byl použit beton o válcové pevnosti 55 MPa, 80 MPa [6] nebo 90 MPa a 130 MPa [7]. Otázkou zůstává, jaký bude přírůstek vzpěrné pevnosti při použití betonu ještě vyšších pevností.

Problémem při výpočtu vzpěrné pevnosti kompozitních sloupů s použitím betonů ultra-vysokých pevností je stanovení modulu pružnosti. Modul pružnosti se obvykle vyjadřuje jako funkce pevnosti v tlaku. Různé národní stavební předpisy navrhuje různé vzorce pro beton s normální pevností a pro beton s vysokou pevností [8]. S ohledem na všechny vhodné metody byl v teoretické studii použit vztah navržený American Committee, protože předpovězené výsledky nejlépe odpovídají hodnotám modulu pružnosti, které byly zjištěny v rámci dřívější experimentální analýzy přímo na betonových vzorcích z deformační křivky.



Obr. 1 Účinek pevnosti betonu na vzpěrnou únosnost sloupu pro sloup délky 3 m a ocel S355.

3 TEORETICKÁ ANALÝZA

V první fázi řešení je provedena teoretická analýza vývoje vzpěrné pevnosti při neustálém zvyšování pevnosti materiálů. Rozměry, délka a uložení trubky zůstávají neměnné. V rovnicích (1) až (4) jsou uvedeny vztahy pro výpočet vzpěrné pevnosti podle [2]. Je zřejmé, že pokud se bude pevnost materiálu zvyšovat, bude se zvyšovat i hodnota poměrné štíhlosti. To povede ke snížení součinitele vzpěru. Uvažujme, že pevnost materiálu budeme zvyšovat nade všechny meze. Potom součinitel vzpěru se bude limitně blížit k nule a charakteristická hodnota plastické únosnosti se bude blížit k nekonečnu. Vzpěrná únosnost pak bude konvergovat k určité hodnotě, která bude její limitou (nad tuto hodnotu se vzpěrná únosnost nikdy nedostane).

$$N_{b,Rk} = \chi \cdot N_{pl,Rk} \quad (1)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\chi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad (2)$$

$$\phi = 0,5(1 + 0,21(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2) \quad (3)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{A_a f_y + A_c f_c}{(EI)_{eff} \cdot \pi^2}} \cdot L_{cr} \quad (4)$$

kde $N_{b,Rk}$ je charakteristická vzpěrná únosnost, $N_{pl,Rk}$ je charakteristická hodnota plastické únosnosti spráženého průřezu, χ je součinitel vzpěru, ϕ je hodnota pro výpočet součinitele vzpěru, λ je poměrná štíhlost, N_{cr} je Eulerova kritická síla, A_a je průřezová plocha oceli, f_y je pevnost oceli na mezi kluzu, A_c je průřezová plocha betonu, f_c je válcová pevnost betonu v tlaku, $(EI)_{eff}$ je efektivní ohybová tuhost spráženého průřezu a L_{cr} je kritická vzpěrná délka (při kloubovém uložení je rovna skutečné délce trubky).

Při vykreslení závislosti vypočítané vzpěrné únosnosti na pevnosti použitého betonu pro různé průměry trubky získáme náznak tohoto trendu – vzpěrná únosnost konverguje k určité hodnotě (Obr. 1). Na obrázku jsou vyznačeny dva body, které reprezentují experimentálně získané výsledky pro trubku TR159/4,5 délky 3,0 m, kloubově uloženou, namáhanou osovým tlakem.

Pro ověření teoretických úvah byla provedena parametrická studie, v rámci které byla vypočítána únosnost CFST s vlivem vzpěru $N_{b,Rk}$ podle [2]. Uvažovány byly sloupy délky 3,0 m a 5,0 m, kloubově uložené, namáhané centrickým tlakem. Proměnnými veličinami byly průměr trubky, tloušťka trubky a pevnost betonu v tlaku. Průměr a tloušťka trubky byly voleny podle sortimentu dostupných trubek, přičemž vybrány byly trubky vhodné pro vybetonování. Ve výpočtu byly použity materiálové charakteristiky oceli třídy S355. Vývoj vzpěrné únosnosti je sledován pro válcovou pevnost betonu v tlaku v rozpětí od 50 MPa do 200 MPa. Modul pružnosti je určen podle odhadu (5) navrženého American Committee pro betony vyšších pevností [8].

$$E_c = 3.32 \cdot \sqrt{f_c} + 6.9 \quad (5)$$

kde E_c je modul pružnosti v GPa a f_c je válcová pevnost betonu v tlaku v MPa.

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

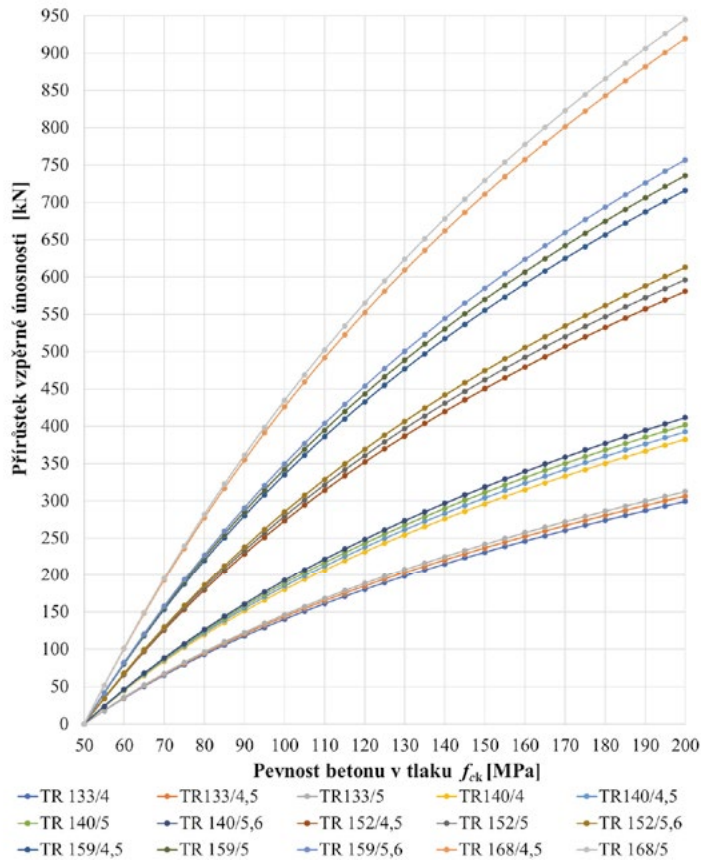
Parametrická studie je zpracována formou tabulek. Je sledován přírůstek vzpěrné únosnosti, způsobený zvýšením pevnosti betonu. Pro větší přehlednost jsou v tomto článku prezentovány jen některé výsledky formou grafů. V grafech je znázorněno, jak roste vzpěrná únosnost CFST v závislosti na pevnosti použitého betonu. Referenční hodnotu představuje únosnost trubky (příslušného průměru a tloušťky) vyplněné betonem C50/55. Tato hodnota v grafu odpovídá nulovému přírůstku. Na Obr. 2 jsou vykresleny přírůstky únosnosti pro trubky s délkou 3 m. Na Obr. 3 jsou tyto závislosti pro trubky s délkou 5 m.

Z grafů je patrné, že křivky pro průřezy stejného průměru mají velmi podobný průběh – liší se v důsledku změny tloušťky ocelové trubky. U trubek větších průřezů je přírůstek vzpěrné únosnosti přirozeně vyšší, ale nemělo by to být chápáno pouze jako důsledek vyšší pevnosti betonu, ale také jako důsledek menší štíhlosti vlivem většího průřezu. V grafech jsou přírůstky pouze pro určité délky sloupu. Při zvětšení délky sloupu budou přírůstky při zachování všech ostatních parametrů CFST prvku menší.

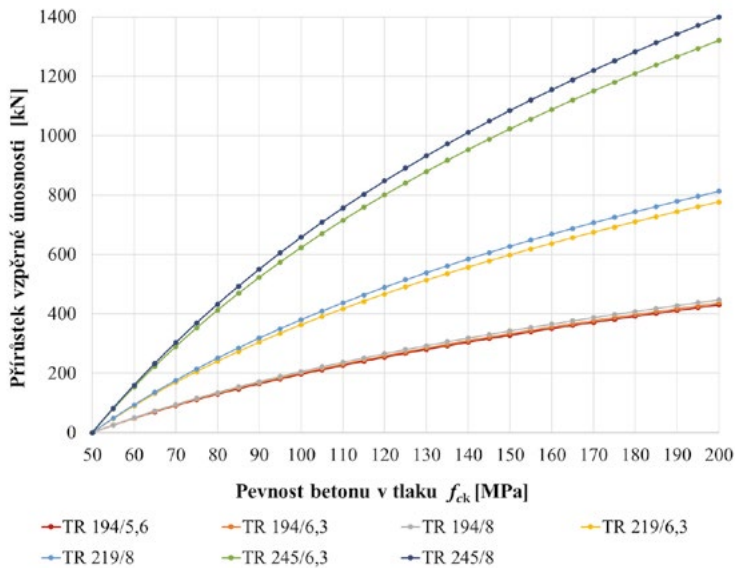
Zajímavé je srovnání přírůstků vzpěrné pevnosti pro různé průměry trubek. Například v Obr. 2: přírůstek vzpěrné únosnosti 200 kN je u trubky průměru 168 mm dosažen zvýšením pevnosti betonu o 20 MPa, u trubky průměru 140 mm zvýšením pevnosti betonu o 55 MPa a u trubky průměru 133 mm zvýšením o 80 MPa.

Z prezentovaného grafického znázornění výsledků vyplývá určitý obecný trend. Pro všechny uvažované průřezy se sklon křivky závislosti vzpěrné únosnosti na pevnosti betonu postupně zmenšuje. To znamená, že křivky mají konkávní charakter. Aby byly tyto průběhy lineární, musela by být konstantní poměrná relativní štíhlost, respektive konstantní součinitel vzpěrnosti. To vlastně nastává při namáhání prostým tlakem. U štíhlých CFST prvků dochází vlivem vzpěru k markantnímu poklesu únosnosti, a to tím většimu, čím vyšší pevnost betonu je použita. S vyšší pevností betonu se totiž zvyšuje poměrná štíhlost prvku, což přináší snížení součinitele vzpěru.

Výsledky ukazují, že použití betonu vyšší pevnosti v prvcích CFST je významné pouze u prvků, kde se vliv vzpěru uplatňuje minimálně. Tento závěr koresponduje s [7], kde je uvedeno, že ke zlepšení únosnosti CFST prvku přispívá excentricita zatížení, avšak pevnost betonu nebo typ výplně má pouze malý vliv.



Obr. 2 Přírůstek vzpěrné únosnosti CFST v závislosti na pevnosti použitého betonu pro sloup délky 3,0 m.



Obr. 3 Přírůstek vzpěrné únosnosti CFST v závislosti na pevnosti použitého betonu pro sloup délky 5,0 m.

5 ZÁVĚR

Článek se zabývá vývojem vzpěrné pevnosti CFST prvků v závislosti na pevnosti použitého betonu. Prezentovány jsou výsledky teoretické a parametrické studie, které navazují na předchozí experimentální analýzu. Experimentálně získaná data naznačily určitý trend vývoje vzpěrné únosnosti při použití betonu vyšší pevnosti ve srovnání s betonem normální pevnosti. Cílem parametrické studie bylo ukázat, jak by tento trend pokračoval, pokud by byly použity ještě vyšší pevnosti betonu.

Účinek pevnosti betonu na celkovou únosnost byl sledován pro všechny průřezy kruhových trubek vhodné k vybetonování. Závěrem lze konstatovat, že použití betonů vysokých pevností u CFST prvků není efektivní, zejména u trubek menších průměrů. Pozornost věnovaná vývoji CFST s betonem vyšší pevnosti by měla být účelněji zaměřena, např. na použití recyklovaného betonu.

Poděkování

Príspevek byl vypracován v rámci projektu Specifického výzkumu Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně č. FAST-S-20-6400.

Použité zdroje

- [1] Bukovska P. Evaluation of the effect of concrete strength increase on buckling resistance of concrete filled tubes. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [Internet]. 2019Jun.01 [cited 2020Nov.13];566. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/566/1/012004>
- [2] ČSN EN 1994-1-1: Eurokód 4: Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. 2.nd ed. Praha: Český normalizační institut; 2006.
- [3] Liew JYR, Xiong M, Xiong D. Design of Concrete Filled Tubular Beam-columns with High Strength Steel and Concrete. Structures [Internet]. 2016;8:213-226. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352012416300261>
- [4] Pires TAC, Rodrigues JPC, Silva JJR. Fire resistance of concrete filled circular hollow columns with restrained thermal elongation. Journal of Constructional Steel Research [Internet]. 2012;77:82-94. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X12000971>
- [5] Aitcin PC. Ultra high strength concrete. In: Science and technology of concrete admixtures. Amsterdam: Elsevir; [2016]. pp. 503-523. (Woodhead Publishing series in civil and structural engineering).
- [6] Bukovská P, Karmazínová M. Behaviour of the Tubular Columns Filled by Concrete Subjected to Buckling Compression. Procedia Engineering [Internet]. 2012;40(1):68-73. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705812024435>
- [7] Portolés JM, Serra E, Romero ML. Influence of ultra-high strength infill in slender concrete-filled steel tubular columns. Journal of Constructional Steel Research [Internet]. 2013;86(1):107-114. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143974X1300093X>
- [8] Demir F. A new way of prediction elastic modulus of normal and high strength concrete—fuzzy logic. Cement and Concrete Research [Internet]. 2005;35(8):1531-1538. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884605000086>

NELINEÁRNA NUMERICKÁ ANALÝZA MEMBRÁNOVEJ KONŠTRUKCIE

NUMERICAL NONLINEAR ANALYSIS OF A MEMBRANE STRUCTURE

Lenka Štulerová^{*1}, Lukáš Kapolka¹, Stanislav Kmet¹

^{*}lenka.stulerova@tuke.sk

¹Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice

Abstrakt

Cieľom nasledujúceho článku je prevedenie modálnej analýzy technickej textílie v tvare hyperbolického paraboloidu. Ide o geometricky nelineárnu membránovú konštrukciu, ktorá je schopná prenášať zaťaženia iba v ťahu. V tomto prípade bolo simulované vlastné kmitanie ako súčasť celkovej dynamickej analýzy. Výsledkom sú vlastné frekvencie a vlastné tvary s pretvoreniami. Získané výsledky prezentujú dynamické správanie sa nelineárnej konštrukcie bez pôsobenia vonkajšieho zaťaženia. Táto analýza tak predstavuje prvý krok a práve vynútené kmitanie ako nelineárna časová analýza doplní v budúcnosti celkovú dynamickú analýzu.

Kľúčové slová

Membrána, modálna analýza, vlastné kmitanie

Abstract

The aim of this paper is the modal analysis of a thin technical textile in shape of hyperbolic paraboloid. It is the geometrically nonlinear membrane structure, which can function only in tension. In this case, the structure was subjected to the natural vibration as a part of the overall dynamic analysis. All of this results in natural frequencies and mode shapes and deflections. Acquired results describe the dynamic behaviour of nonlinear system without affect of the external load. This part could represent a first step in the dynamic analysis and exactly the forced vibration as nonlinear time history analysis will have to be performed in a future to complete it.

Key words

Membrane, modal analysis, natural vibration

1 ÚVOD

Membrány môžeme definovať ako materiál 6. generácie po tradičných materiáloch ako tehla, drevo, kameň, oceľ a betón. Membránové konštrukcie sú vytvárané z technických textílií. Ide o materiál, ktorý má veľmi malú hmotnosť a používajú sa hlavne na preklopenie veľkých rozpätí bez potreby medziľahlých podpier. Z týchto faktov vyplýva úspora materiálu, a teda zníženie počiatočných nákladov. Tento ekonomický aspekt podtrhuje fakt, že membrány fungujú iba v ťahu, čím využívajú svoje pozitívne vlastnosti, ktoré sa odrážajú v predĺžení ich vlastnej životnosti.

Ale rovnako ako akýkoľvek iný materiál, aj technické textílie majú svoje negatíva. Ide o silne geometricky nelineárne konštrukcie, ktoré majú náročnejšiu fázu návrhu. Na rozdiel od tradičných materiálov menia membrány svoj tvar v závislosti od pôsobiaceho zaťaženia, takže musíme pristupovať k výpočtom krok po kroku. Nelineárna analýza s iteračným procesom je tak neodmysliteľnou súčasťou numerickej simulácie a analýzy.

Ďalším špecifikom membrán je nutnosť ich predopnutia na zabezpečenie prenosu zaťaženia. Keďže sú technické textílie vo svojej podstate iba tkaniny, počiatočné podmienky si vyžadujú definovanie predpätia membránového povrchu. Keďže ich potrebujeme predopnúť, nepoznáme ich začiatočný tvar. Na tento účel slúži proces form-findingu, ktorý hľadá rovnováhu medzi predpätím a deformáciou, resp. začiatočným tvarom.

Form-finding je špecifický krok pri návrhu membránových konštrukcií, bez ktorého nie je možné pokračovať statickou alebo dynamickou analýzou. Na tento účel nestačia jednoduché matematické postupy. Kedysi sa používali rôzne fyzické modely, dnes sú to vhodné výpočtové metódy.

Vo všeobecnosti pozostávajú membránové konštrukcie z 3 základných častí: technická textília ako plošný prvok, stabilizujúci líniový prvok zabezpečujúci predpätie (lano, tuhý prvok) a základná nosná konštrukcia, ktorá umožňuje prenos vnútorných síl do podlažia.

2 POUŽITIE MEMBRÁN

Konštrukcie ľahkej architektúry, ktoré zahŕňajú aj skúmané membrány, môžeme definovať schopnosťou prenášať rovnaké množstvo zaťaženia pri nižšej vlastnej hmotnosti vzhľadom na vnútorné sily. A rovnako ako akékoľvek iné konštrukcie, aj textilné konštrukcie podliehajú prísnyim požiadavkám na mechanickú odolnosť a stabilitu vzhľadom na špecifiká uvedené v predošlej kapitole.

Použitie membránových konštrukcií sa datuje tisíce rokov dozadu, a to formou dočasných zastrešení a stanov, napríklad cirkusový stan chapiteau. Konštrukcie ľahkej architektúry vo forme, v akej ich poznáme dnes, začali dizertačnou prácou Otta Freia "Das Hängende Dach" v roku 1952. V roku 1967 sa Otto Frei zúčastnil návrhu Nemeckého pavilónu (Obr. 1) na Svetovom Expo v Montreale. Hoci bol pôvodný návrh pavilónu tvorený nosnou konštrukciou membrány, nakoniec bol skonštruovaný ako lanová sieť s dodatočným prekrytím technickou textíliou [1].



Obr. 1 Nemecký pavilón na Svetovom Expo [1].

3 NUMERICKÝ MODEL

Na uskutočnenie numerickej analýzy bola namodelovaná membrána v tvare hyperbolického paraboloidu. Bol použitý MKP softvér Dlubal RFEM. Táto 3D konštrukcia je tvorená ortotropným materiálom, ktorý má rôzne vlastnosti v dvoch na seba kolmých smeroch. V hlavnom smere (nazývaný smer osnovy) má membrána modul pružnosti $E_x=1\ 057\ \text{MPa}$, v smere útku je modul $E_y=612\ \text{MPa}$ [2]. Tieto hodnoty prezentujú charakteristiky dané od výrobcu technickej textílie Serge Ferrari Précontraint 502.

Další parameter, ktorý charakterizuje numerický model, je pôdorysný rozmer $2 \times 2\ \text{m}$ s celkovou výškou 1 m. Na okrajoch plošného prvku sú namodelované lineárne prvky - laná s priemerom 8 mm. Ide o prvky s nerezovej ocele s modulom pružnosti $E=130\ \text{GPa}$. Zabezpečujú v konštrukcii predpätie prostredníctvom definovaného previsu s veľkosťou 0,2 m. Predpätie membrány je v oboch smeroch (v smere osnovy a útku) rovnaké a má hodnotu $n_x=n_y=4\ \text{kN/m}^2$.

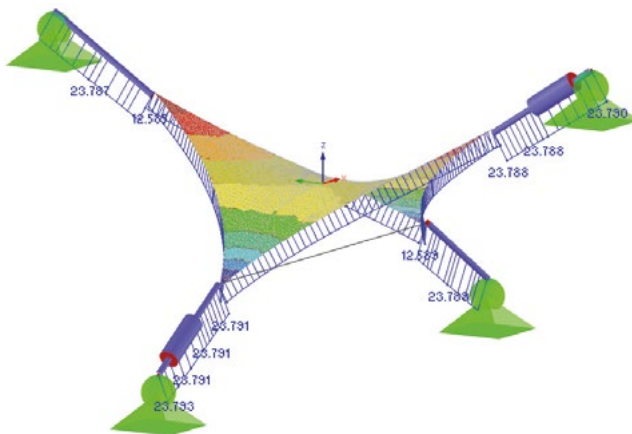
Membrána stabilizovaná okrajovými lanami je kotvená pomocou 2 kotevných tyčí a 2 akčných prvkov. Akčné prvky, alebo aktuátory, sú elementy, ktoré môžu meniť svoju dĺžku a tak meniť samotné predpätie membrány. Zapojením týchto prvkov sa z membrány stáva aktívna konštrukcia. Táto možnosť zmeny dĺžky a predpätia v tomto prípade nebola uvažovaná.

Kotvenie je modelované formou plných kruhových prierezov D46 a D145. Tieto prierezy prezentujú hmotu na reálnom experimentálnom zariadení, na ktorom budú verifikované numerické modely v ďalších krokoch výskumu.

Keďže Dlubal RFEM počíta metódou konečných prvkov, v tomto prípade bolo zvolené nasledujúce delenie siete: 1D prvky ako kotvenie a okrajové laná sa delia na 10 dielikov na prvok, 2D plošné elementy membrán vo forme trojuholníkových konečných prvkov majú dĺžku hrany nastavenú na 50 mm [3], [4]. Membrána, ako priestorový prvok, bola modelovaná ako 2 trojuholníky so spoločnou spodnou hranou a hornými vrcholmi.

Pred tým ako dôjde k spusteniu akéhokoľvek statického alebo dynamického výpočtu, musí namodelovaná konštrukcia prejsť procesom form-findingu, ktorého cieľom je nájsť začiatočný stav v závislosti od predpätia. Dlubal RFEM používa pre túto potrebu Update Reference Strategy (URS). V podstate sa konštrukcia zaťažuje predpätím krok za krokom a trasuje sa pretvorenie uzlov konečných prvkov [5].

Na Obr. 2 sú vyobrazené napätia na membráne a vnútorné sily v kotvení po spustení form-findingu. Je dôležité poznamenať, že form-finding počíta bez uváženia vlastnej tiaže.



Obr. 2 Membrána po form-findingu.

4 MODÁLNA ANALÝZA A VÝSLEDKY

Dlbal RFEM, ako MKP softvér, má k dispozícii niekoľko add-on modulov. Jedným z nich je aj RF-DYNAM PRO, ktorý slúži na dynamickú analýzu. V tomto článku bola uskutočnená analýza vlastného kmitania, výsledkom ktorej sú vlastné frekvencie a vlastné tvary. Vytvorený bol 1 hmotový stav, definovaný ako stály, prezentujúci vlastnú tiaž konštrukcie.

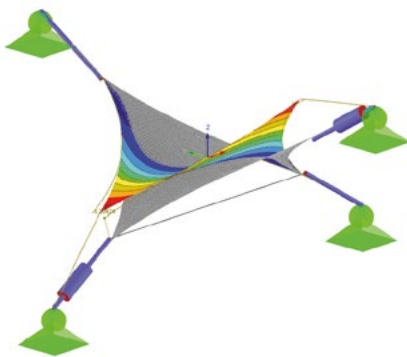
Z tohoto hmotového stavu bol následne vytvorený 1 stav vlastného kmitania. Minimálny počet vlastných tvarov bol stanovený na 10, úprava vlastných tvarov bola zvolená na základe odporúčania podľa manuálu (pre nelineárnu analýzu) na $\{u_j\}^T [M] \{u_j\} = 1$ [6].

Pre počítaný stav vlastného kmitania bola uvažovaná konzistentná matica tuhosti a Lanczosova metóda pre výpočet vlastných čísel. Je dôležité podotknúť, že v tomto stave bola upravená tuhosť konštrukcie prebratím tuhosti zo stavu form-findingu.

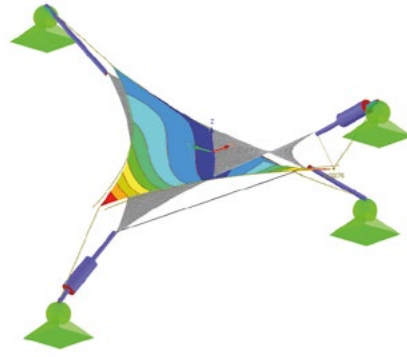
V Tab. 1 je možné vidieť všetkých 10 vlastných tvarov s uvážením vlastnej tiaže, ich uhlové frekvencie ω a periódy T . Na Obr. 3 je možné vidieť tieto vlastné tvary spolu s maximálnou výchylkou.

Tab. 1 Stav vlastného kmitania.

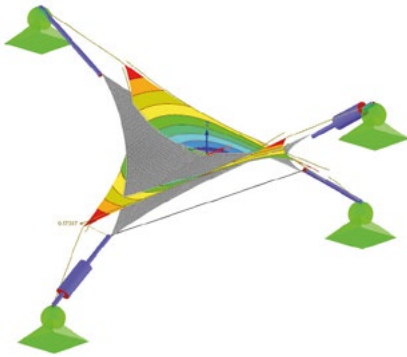
Vlastný tvar	Uhlová frekvencia	Vlastná frekvencia	Vlastná perióda
	ω [rad/s]	f [Hz]	T [s]
1	57,194	9,103	0,110
2	60,423	9,617	0,104
3	66,525	10,588	0,094
4	92,430	14,711	0,068
5	99,507	15,837	0,063
6	180,117	28,667	0,035
7	220,290	35,060	0,029
8	314,971	50,129	0,020
9	344,839	54,883	0,018
10	378,327	60,213	0,017



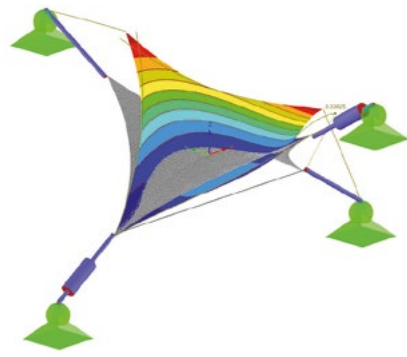
1. vlastní tvar



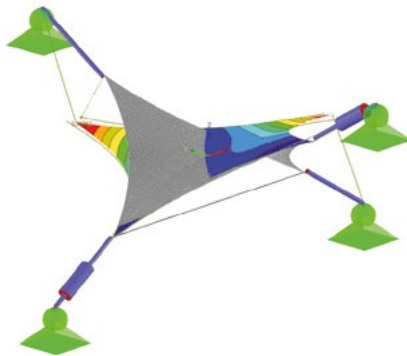
2. vlastní tvar



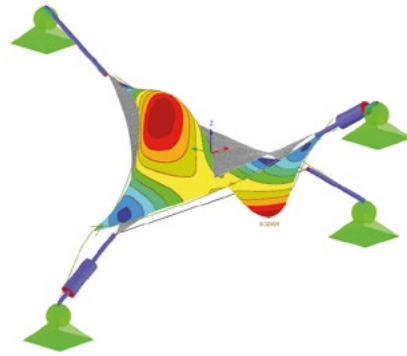
3. vlastní tvar



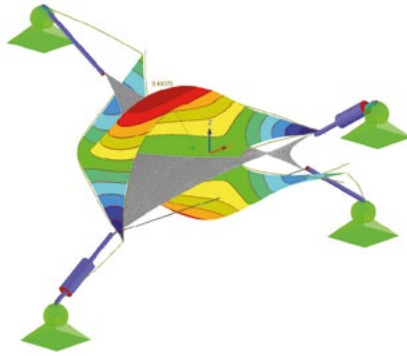
4. vlastní tvar



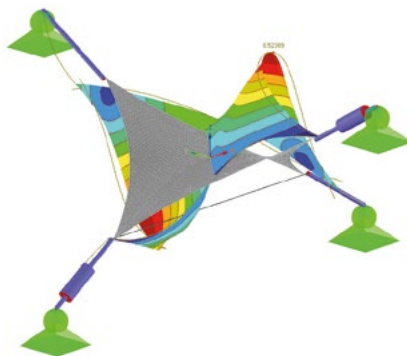
5. vlastní tvar



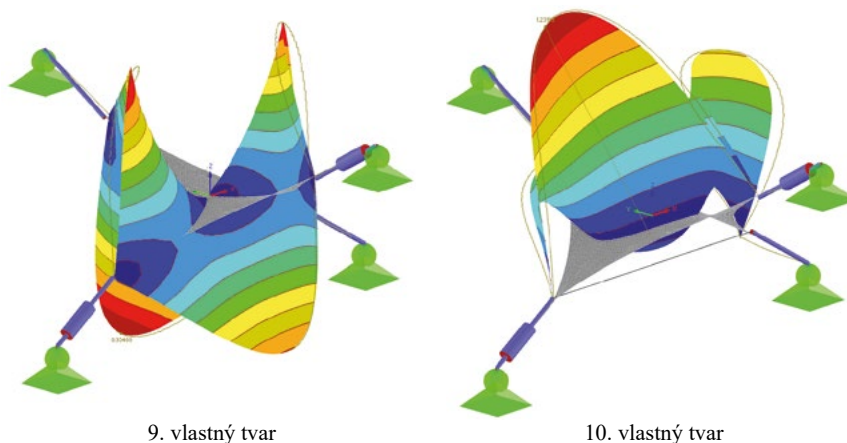
6. vlastní tvar



7. vlastní tvar



8. vlastní tvar



Obr. 3 Zobrazenie vlastných tvarov.

5 ZÁVER

Cieľom tohoto príspevku bolo uskutočniť modálnu analýzu. Vo výsledku sme dostali hodnoty vlastného kmitania membránovej konštrukcie. Táto konštrukcia je silne geometricky nelineárna a vyžaduje si špecifický krok pred samotnou statickou alebo dynamickou analýzou. Tento krok robí membrány výnimočnými v porovnaní s typickými materiálmi.

Ako je možné vidieť v Tab. 1 a na Obr. 3, najnižšia vlastná frekvencia je mierne vyššia než 9 Hz. Môžeme tak povedať, že frekvencia je nižšia ako 10 Hz, čo prezentuje dynamický vietor, avšak je vzdialená hodnote 5 Hz, ktorá je významná pre dynamický vietor. V tomto prípade je nutné domodelovať oceľový rám, v ktorom je konštrukcia membrány uložená rovnako ako je to na reálnom experimentálnom zariadení v laboratóriu. Tento krok bude mať významný vplyv na výsledky vlastného kmitania a dynamickej analýzy.

Taktiež je nutné v budúcnosti uskutočniť analýzu s vynúteným kmitaním, čo rozšíri tento výskum. Či už to bude harmonické, periodické kmitanie s uvážením a bez uváženia tlmenia.

Všetky tieto kroky je nutné na záver porovnať s výsledkami získanými z experimentálneho zariadenia.

PodĎakovanie

Vypracovanie tohto výskumu a článku je podporované Agentúrou na podporu výskumu a vývoja, č. zmluvy APVV-15-0777 a Vedeckou grantovou agentúrou, č. zmluvy VEGA 1/0129/20.

Použitá zdroje

- [1] FOSTER, Brian a Marijke MOLLAERT. European Design Guide FOr Tensile Surface Structures. Germany: Tensinet, 2003.
- [2] INOVA, Praha s.r.o. Dokumentácia k skúšobnému zariadeniu - 17 120: časť 1 - Plachtostroj. Praha: INOVA Praha, 2017.
- [3] KAPOLKA, Lukáš. Analysis of an experimental tension structure. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol, 2019, s. 6.
- [4] ŠOLTÝS, Róbert a Michal TOMKO. Analýza kmitania lana zaťaženého vetrom. In: Juniorstav 2012: 14. odborná konferencia doktorského studia. Brno: Vysoké Učení Technické V Brně, 2012.
- [5] DLUBAL, RFEM 5. Spatial Models Calculated According to Finite Element Method User Manual. Germany: Dlubal Software, 2019.
- [6] DLUBAL, RF-DYNAM Pro. Natural Vibration Analysis, Response Spectra, Time History, Equivalent Static Forces Program Description. Germany: Dlubal Software, 2019.

NUMERICKÁ ANALÝZA HLINÍKOVÝCH A NEREZOVÝCH KOTVIACICH PROFILOV SKLENENÝCH ZÁBRADLÍ

NUMERICAL ANALYSIS OF ANCHORING PROFILES MADE OUT OF ALUMINIUM AND STAINLES STEEL FOR GLASS BALUSTRADES

Martin Lavko^{*}1, Daniel Dubecký¹, Vincent Kvočák¹, Oto Roth¹

^{*}martin.lavko@tuke.sk

¹Technická Univerzita v Košiciach, Stavebná fakulta, Ústav inžinierskeho staviteľstva, Vysokoškolská 4, 042 00 Košice

Abstrakt

Predložený príspevok popisuje dnes veľmi populárne sklenené zábradlia. Špeciálne sa zameriava na kotviace profily vyrobené z hliníka alebo nerezovej ocele a ich numerické modely pre statické výpočty. Diskutuje sa o problémoch týkajúcich sa sklenených zábradli, ako je nadmerné vychýlenie a lokálne špičkové napätia. Komplexné modely celého skleneného zábradlia s mnohými samostatnými komponentmi boli modelované v programe ANSYS Workbench. Kroky, ktoré viedli k získaniu napätí v konštrukcii pomocou metódy konečných prvkov, sú objasnené. Numerické modely uvedené v článku sú odvodené z modelu, ktorý bol overený experimentálnou analýzou.

Klíčová slova

Sklenené zábradlia, kotviace profily, hliník

Abstract

The presented paper describes nowadays very popular glass balustrades. Especially it is focused on anchoring profiles made out of aluminium or stainless steel, and their numerical models for structural analysis. Issues related to glass balustrades like excessive deflection and local peak stresses are discussed. Complex models of a whole glass balustrade system with many single components in it were modelled in ANSYS Workbench. The steps that led to obtaining stresses in the structures using the Finite element method are clarified. Numerical models shown in the article are derived from the model, which was verified and validated by experimental analysis.

Key words

Glass balustrades, anchoring profiles, aluminium

1 INTRODUCTION

Glass balustrades are emerging on the market and nowadays are pushing classic timber and steel balustrades on the side [1]. But due to limitations of glass-like brittle failure and significant deflections due to the slenderness of the structures those balustrades are mostly used in residential buildings. That phenomena is joint with the fact that according to the standard STN 74 3305: Guard railings horizontal load apply on the upper edge of the railing is 3 times lower than in other buildings like stadiums, museums, or operas [4]. It is not only glass facing excessive deflections, but also anchoring profiles joining glass to other primary load-bearing structures must be stiff enough. This brings more issues as requirements on the beauty of the whole structure brought by architects on the anchoring profiles are demanding [2]. Those requirements push engineers to design the anchoring profiles as small as possible.

Materials like aluminium and stainless steel for anchoring profiles were proven as the most efficient and the most appealing to a visitor and a user of the building. But the geometry of those profiles, stiff enough to withstand desirable load applied on the structure needed to be developed. To be the most effective, the designed profiles needed to be as stiff as possible while using the least material possible.

First, the research was focused on the linear support of glass made out of aluminium. Later it was aimed at the point support made out of stainless steel. In the development of the anchoring profiles, specimens were at first

experimentally tested in the laboratory. Then the numerical model was created and verified for the experiments. After the required conformity was achieved, the parametric study was provided on the new geometry. Based on the data and information gained from the experimental and numerical analysis of linear support the newly developed model of the point support was subjected to numerical analysis. Numerical analysis was provided in ANSYS Workbench software.

2 PRESENT STATE

As stated in the previous chapter, glass railings can be divided into two groups by the way they are supported. It is linear support and point support [3].

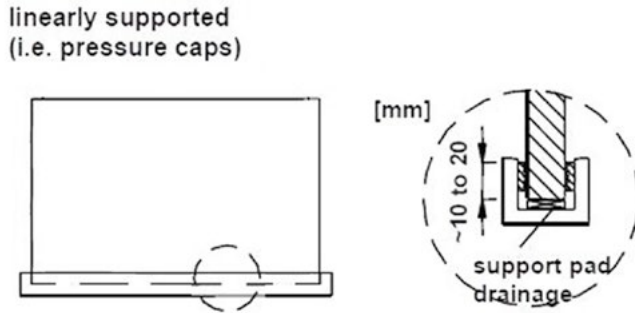


Fig. 1 Linear support of a glass railing [3].

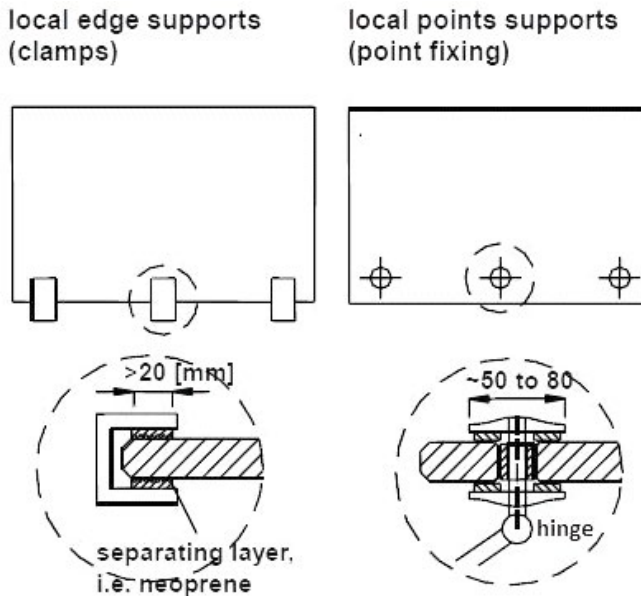


Fig. 2 Point supports of a glass railing [3].

In the past, research has been performed regarding the structural capacity of free-standing glass balustrades [5], [6], [7]. However, these studies were mainly focused on the structural behaviour under static or cyclic loads which are common loads acting on barriers. A few research on blast loading and hard body impact on glass has been reported [8], [9], [10], [11]. However, those studies were only focused on simplified models or analytical solution, thus they do not offer a good representation of the real railing assembly [6]. To simulate the behaviour of the anchoring profiles with glass inserted in it, the more complex numerical models are needed.

3 METHODS

At first, the experimental analysis was provided. In total 3 specimens were tested. Tempered glass 2 x 10 mm with PVB foil of thickness 0,76 mm of dimension 1000 x 1200 mm (width x height) was inserted in the aluminium profile. To prevent the formation of local peak stresses in glass PVC washers were used between the glass and aluminium. The gaps on the upper side between glass and profile were filled with rubber sealants from both sides. Then the railing was loaded. Horizontal load of magnitude ranging from 0 kN to 1 kN was applied on the upper edge of the glass. Obtained results are whose in table 1.

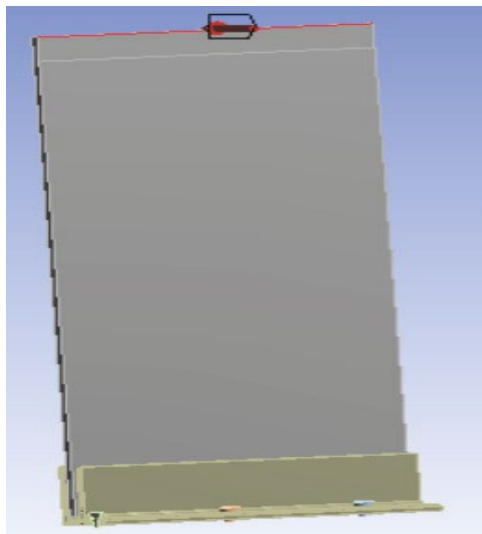


Fig. 3 Loaded model.

Tab. 1 Average values measured and the railing in the experimental analyses.

	Max. deflection glass [mm]	Max deflection profile [mm]	Stress on profile [MPa]	Stress on glass [MPa]
1 kN	72,9	3,1	58,4	30,9

The numerical model was created in ANSYS Workbench. The model contained glass, aluminium profile, PVC washers and simplified bolts. The model was simplified, so the rubber sealants were not included in the numerical model. The symmetry of the structure was used, thus finite element mesh could be finer compared to if the whole structure was modelled.

Tab. 2 Material properties used in numerical model

	Young modulus [GPa]	Poisson's Ratio [-]	Density [kg/m ³]	Tensile strength [MPa]
Aluminium	69,0	0,33	2700	160
Glass	68,0	0,23	2530	120
PVC	2,4	0,4	1350	45
Structural steel	200	0,3	7850	235

As the applied load is shortterm load, the linear distribution of stress across the glass is expected. The PVB foil shows very small stiffness, thus its contribution to lowering the total deformation of glass and stress on the surface of the glass pane should be neglected. As should be neglected, the PVB foil is not involved in the numerical model and the glass pane is modelled as monolithic.

Choose of connections and support is essential to create the model to simulate real tests. Fixed support was applied on the bottom face of each bolt. Zero displacements in the vertical direction were applied on two bottom faces of the aluminium profile.

Contact regions were detected automatically by the software and then they were revised. The connection between the bolt's body and profile was set to frictionless. This setting allows bodies in contact to slide to each other and allows gaps to open between connected bodies. The connection between the bolt head and the aluminium profile was set to frictional with friction coefficient 0,2. Contacts between glass and aluminium profile were set as frictionless. Contacts between glass and PVC washers were modelled as frictionless on one side and the other as rough. The rough option only allows gaps to open, but do not allows two bodies in contact to slide. Bonded contacts were used between PVC washers and aluminium profile.

The model was loaded by the standard earth gravity and by a load od 1 kN on the upper edge. Similar as in the experimental analysis. The results were obtained by using a non-linear finite element method, as it was taken into consideration that the stress on the profile may exceed the yield strength of the material used. In the picture below the numerical model is shown.

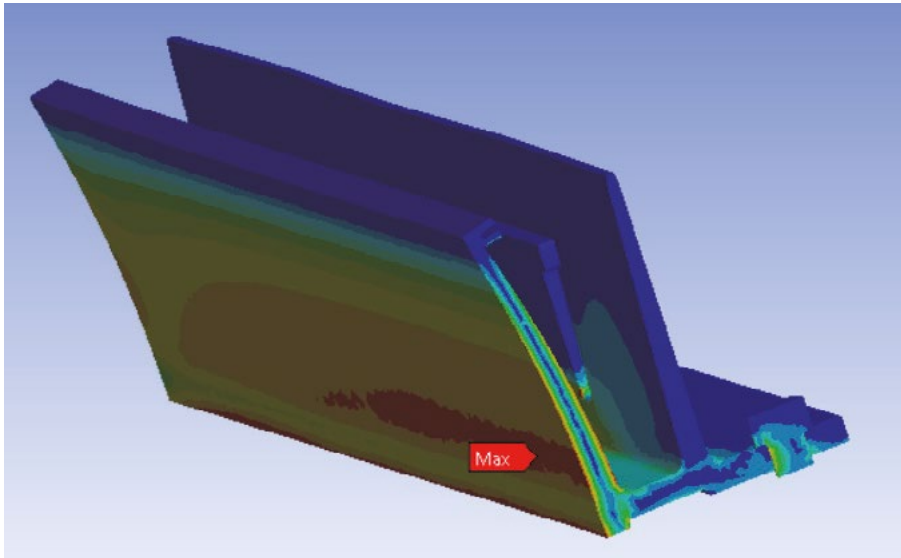


Fig. 3 Deformed numerical model of the tested railing.

The maximum deflection of the glass occurred on the upper edge. It was 50,2 mm. The maximum deflection of the profile was 2,3 mm. Stress on the glass in the point where it was measured during experiments was 32,3 MPa and on the profile, it was 78,7 MPa. The differences between measured values on tested specimens and model are debated in the chapter Discussion.

4 RESULTS

After the model was calibrated, new geometries of aluminium profile and profile made out of stainless steel were analysed in the ANSYS Workbench software. The connections, supports and the load were the same as in the previous model. The difference is in the thickness of the used glass. In the following models tempered glass 2 x 6 mm with PVB foil 0,76 mm was used. Aluminium linear support was lightened comparing the profile in experimental analysis.

The improved aluminium profile showed the maximum deflection of 1,4 mm. The maximum deflection of glass was 67 mm. The recorded stress in the same points as in the previous model was 64,7 MPa on the glass and 124,3 MPa on the profile.

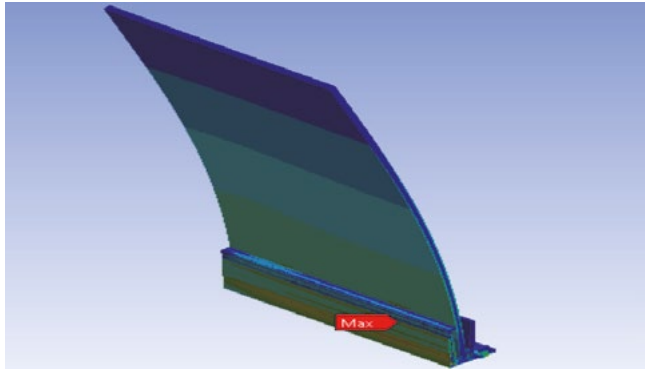


Fig. 4 Deformed numerical model of the improved railing.

For the other support, the glass with same height, width and thickness was used. Three point supports were used. In this case the total height of the balustrade is 1,25 m from the ground. The stainless steel point supports called "Spigot" showed the maximum deflection of 0,8 mm. The maximum deflection of glass was 23,7 mm. The recorded stress maximum stress as on the profile was 392,2 MPa.

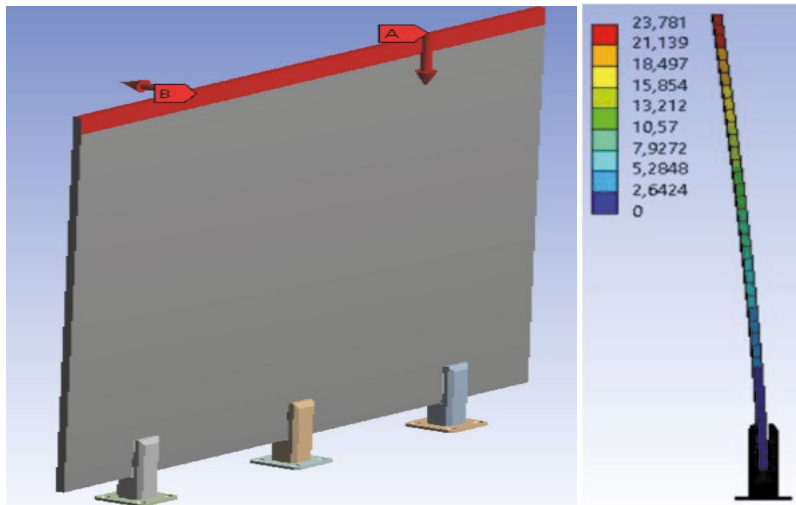


Fig. 5 Numerical model of the balustrade with fixed-point support and deflection.

5 DISCUSSION

The differences between the results obtained on tested specimens and the modelled specimens might be caused by the simplification of the model. On the other hand, models need to be simplified as the computation performance and the software and hardware are limited. The higher deflection measured during experimental analysis might be caused by the lifting of the heel of the profile. Lifting should be allowed by loosen bolts. Also, thick rubber between the glass and the aluminium profile should add few millimetres of deflection of the glass pane. An engineering approach is needed to analyse the presented results obtained by the numerical analysis.

At the moment, there isn't a codified standard in Slovakia regarding glass load bearing structures. There is only description of impact tests of glass balustrades with no specified limit deflection. According to the British standard BS 6180 the displacement of any point of the barrier should not exceed $L/65$ or 25 mm, whichever is the smaller [12]. In Germany admissible deflection is $L/100$ (DIN 18008-2) [13]. In Italy the acceptable value is 100 mm. If the results are compared to requirements in Europe, this balustrades are only applicable in Italy.

6 CONCLUSION

Development of a new anchoring profile is a complex issue. Numerical analysis is a perfect tool to lower the cost of the development as well as it lowers the time needed to analyse the new product. But the results of numerical analysis are very dependent on the input and require experience, knowledge and skill of an engineer who performs the analysis. To bring the new product on the market experimental analysis of the specimens is needed, to confirm or refute the results obtained from the numerical model.

Acknowledgement

The presented paper was supported by the project: VEGA 1/0172/20 "Stress and deflection analysis of load-bearing components made out of steel, glass and composite materials" of the Scientific Grant Agency of the Ministry of Education, science research and sport of the Slovak Republic and the Slovak Academy of Sciences.

References

- [1] J. Wurm, Glass structures: design and construction of self-supporting skins (Basel: Birkhäuser, c2007) ISBN 978-3-7643-7607-9.
- [2] W. Cox, Through the looking glass, or does your facade have a facade (Proceeding of GlassCon Global, Chicago 2018)
- [3] M. Eliášová, Lectures of Glass structures (Department of Steel and Timber Structures, Faculty of Civil Engineering, CTU in Prague, 2015)
- [4] STN 74 3305
- [5] A. Goosen, Structural Capacity of Freestanding Glass (Master Thesis, University of Stellenbosch, Stellenbosch 2007)
- [6] Y. Baidjoe, B. Van Lancker, J. Belis, Calculation methods of glass parapets in aluminium clamping profiles, Glass Struct Eng (2018) 321-34
- [7] K. Seonwoong, Structural performance evaluation of a full-scale tempered glass guard and handrail system, Adv Mech Eng (2018)
- [8] K. Spiller, JA. Packer, MV. Seica, DZ. Yankelevsky, Prediction of annealed glass windows response to blast loading, Int J Impact (2016) 189-200
- [9] C. Bedon, R. Kalamar, M. Eliášová, Low velocity impact performance investigation on square hollow glass columns via full-scale experiments and Finite Element analyses, Composit Structures (2017)
- [10] P. De Linz, PA. Hopper, H. Arora, Y. Wang, D. Smith, RK. Blackmann, JP. Dear, Delamination properties of laminated glass windows subject to blast loading. Int J Impact Eng (2017)
- [11] X. Wang, J. Yang, Q. Liu, C. Zhao. Experimental investigations into SGP laminated glass under low velocity impact, Int J Impact Eng (2018)
- [12] BS 6180:2011 - Barriers in and about buildings. Code of practice
- [13] DIN 18008-2:2020-05 - Glass in Building - Design and construction rules - Part 2: Linearly supported glazings

TEORETICKÝ VÝZKUM OPTIMALIZACE ROZMĚRŮ A VOLBY PEVNOSTI MATERIÁLU U OCELOBETONOVÝCH SPŘAŽENÝCH NOSNÍKŮ

THEORETICAL RESEARCH OF DIMENSIONAL OPTIMALIZATION AND CHOICE OF MATERIAL STRENGTH IN STEEL-CONCRETE COMPOSITE BEAMS

Kristýna Hrabovská^{*1}, Jan Břečka¹

*hrabovska.k@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav kovových a dřevěných konstrukcí, Veveří 95, Brno, 602 00

Abstrakt

Cílem tohoto výzkumu je zjistit, jak změna jednotlivých parametrů ovlivní celkovou únosnost v ohybu u ocelobetonových spřažených nosníků. Projekt byl zaměřen na volbu pevnostních tříd jednotlivých materiálů a na volbu rozměrů, konkrétně výšku betonové desky a velikost ocelového profilu. Výzkum má za cíl odhalit, které parametry mají dominantní vliv na únosnost a tím usnadnit optimalizaci návrhu v běžné praxi.

Klíčová slova

Ocelobetonové spřažené konstrukce, pevnost materiálů, rozměry, ohybová únosnost, parametrická studie

Abstract

The aim of this study is to find out how the change of individual parameters will affect the flexural strength of steel-concrete composite beams. The project was focused on the choice of strength of materials and the choice of dimension, specifically the height of the concrete slab and the size of the steel profile. The research aim is to reveal which parameters have dominant influence on the flexural strength and thus facilitate the optimization of the design in practice.

Key words

Steel-concrete composite structures, material strength, dimensions, flexural strength, parametrical study

1 ÚVOD

Ocelobetonové spřažené konstrukce se těší stále větší oblibě ve stavebním inženýrství téměř po celém světě. Jejich využití se uplatňuje především u řešení patrových budov. U ocelobetonových prvků se využívá příznivých vlastností obou použitých materiálů, díky čemuž získáváme velmi dobré pevnostní vlastnosti. Beton má vysokou pevnost v tlaku a přenáší tudíž tlaková zatížení a naopak ocel má vysokou pevnost v tahu a přenáší tahová zatížení. Zároveň díky kombinaci obou materiálů dochází k nalezení hospodárného a současně efektivního průřezu. Existuje nepřeberné množství různých kombinací pevností materiálů a rozměrů jednotlivých komponent, proto je výzkum zaměřen právě na teoretickou optimalizaci volby materiálu dle jeho pevnosti a rozměrů jednotlivých částí spřaženého nosníku.

Hlavní myšlenka výzkumu je zjistit, jak změna jednotlivých vstupních parametrů ovlivní výslednou ohybovou únosnost. Konkrétně se jedná o změny pevnostní třídy použitého betonu, výšky betonové desky, pevnostní třídy ocelového IPE profilu a volby použitého IPE profilu. Ze vztahu pro plastický výpočet ohybové únosnosti byl vyjádřen obecný matematický vztah, který ukazuje přírůstek oproti původní ohybové pevnosti při procentuální změně některého parametru. Tento vztah byl dále ověřen pomocí výpočtů v tabulkovém procesoru a dále byla provedena parametrická studie porovnávající získanou ohybovou únosnost. Veškeré výpočty byly provedeny s ohledem na Eurokódy [1],[2],[3].

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Ocelobetonové spřažené konstrukce se řídí dle platného Eurokódu 4 [1]. Tato norma uvažuje pouze s využitím betonu pevnostních tříd C20/25 až C50/60 a oceli do pevnostní třídy S420. Proto se v dnešní době velká část výzkumů zaměřuje právě na použití materiálů vyšších pevností a na jejich použití v praxi, např. [4]. Další velká část výzkumů týkajících se ocelobetonových konstrukcí se zaměřuje na vývoj a testování nových spřahovacích prostředků, jako jsou různé typy perforovaných lišty nebo smykové trny umožňující prokluz.

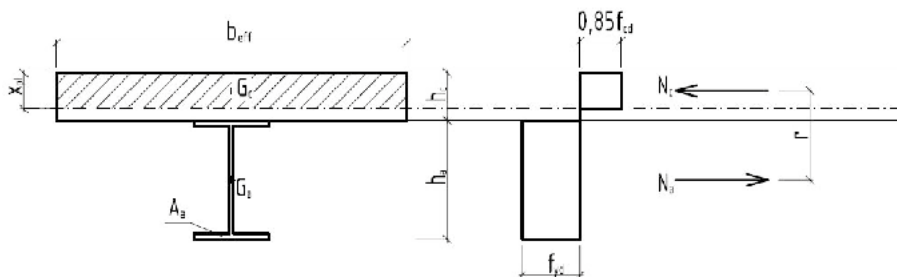
Výzkum porovnávací deformaci a napětí u kompozitních nosníků provedli V. Preetha, V. Senthikumar, K. Kalaviani a S. Navaneetha ze stavební fakulty Bannari Amman Institute of Technology v Sathyamangalamu v Indii, viz. [5]. Porovnávali napětí a deformace na T nosníku tvořeném betonovou deskou tloušťky 80, 100 a 120 mm a třemi rozdílnými ocelovými profily ISMB 150, ISMB 200 a ISMB 250 (ISMB = Indian Standard Medium Beam). Nosník byl uvažován jako prostě podepřený se stabilní délkou 1500 mm a šířkou desky 500 mm. Výsledky byly získány pomocí výpočetní techniky, konkrétně modelováním pomocí metody konečných prvků v programu ANSYS. Tento výzkum se zabýval pouze optimalizací rozměrů dílčích částí nosníku a nezahrnoval vliv různých pevnostních tříd použitého betonu či oceli.

Tento výzkum má za cíl zahrnout do výpočtu kromě změn některého z rozměrů i změnu pevnosti materiálů a zjistit, který parametr má dominantní vliv na celkovou ohybovou únosnost kompozitního nosníku.

3 METODIKA

Při výpočtu ohybové únosnosti ocelobetonových spřažených nosníků v plastické oblasti platí předpoklad zachování rovinosti průřezů a platnosti pracovních diagramů. Plastická neutrální osa se ve většině případů vyskytuje v betonu a pro tuto variantu byly provedeny i následující výpočty.

Uvažujme kompozitní nosník, který vznikne účinným spřažením betonové desky šířky b_{eff} , výšky h_c a charakteristické pevnosti v tlaku f_{ck} a ocelový profil řady IPE dané plochy A_a , výšky h_a z oceli o jmenovité mezi kluzu f_y . Na horní povrch betonové desky bude uvažováno zatížení, které vyvolá prostý ohyb. S využitím idealizace průběhu napětí jsme schopni vykreslit obrazec napětí na daném nosníku pro ocelový profil i pro beton v tlaku. Na ocelový profil působí síla N_a s působištěm v těžišti IPE profilu. Na beton působí stejně velká, opačně orientovaná síla N_c s působištěm v těžišti tláčené části betonu.



Obr. 1 Vykreslení napětí působícího na spřažený nosník, když plastická neutrální osa prochází betonem.

Hodnota síly N_a působící na profil IPE se spočítá dle vztahu

$$N_a = f_{yd} \cdot A_a \quad (1)$$

kde A_a značí celkovou plochu ocelového průřezu a f_{yd} je mez kluzu použité oceli.

Hodnota síly N_c působící na tláčenou část betonové desky se získá ze vztahu

$$N_c = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot x_{pl} \cdot b_{eff} \quad (2)$$

kde f_{cd} je návrhová pevnost použitého betonu, b_{eff} je efektivní šířka betonové desky a x_{pl} je poloha neutrální osy od horního okraje betonové desky.

Z rovnosti těchto dvou sil N_a a N_c lze dopočítat polohu neutrální osy jako

$$x_{pl} = \frac{f_{yd} \cdot A_a}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_{eff}} \quad (3)$$

Celková únosnost daného ocelobetonového spráženého nosníku lze spočítat ze vztahu

$$M_{pl,Rd} = N_a \cdot r \quad (4)$$

kde N_a je síla působící na ocelový profil a r značí rameno mezi silami N_a a N_c , tedy vzdálenost těžiště nosníku IPE a těžiště tlačené části betonu.

Velikost ramene r se dá spočítat jako

$$r = h_c + \frac{h_a}{2} - \frac{x_{pl}}{2} \quad (5)$$

kde h_c je výška betonové desky, h_a výška IPE profilu a x_{pl} poloha neutrální osy od horního povrchu betonové desky.

Pokud dosadíme rovnici (3) do rovnice (5) a tu společně s rovnicí (1) do rovnice (4) získáme vztah pro výpočet ohybové únosnosti spráženého nosníku

$$M_{pl,Rd} = A_a \cdot f_{yd} \cdot \left(h_c + \frac{h_a}{2} - \frac{A_a \cdot f_{yd}}{2 \cdot 0,85 \cdot b_{eff} \cdot f_{cd}} \right) \quad (6)$$

Rovnice (6) sloužila jako výchozí pro odvození vztahů pro novou ohybovou únosnost $M_{pl,Rd,N}$, vyjádřenou jako součet původní ohybové únosnosti a přírůstku způsobeného procentuálním navýšením některého ze čtyř zkoumaných parametrů.

Při změně výšky betonové desky h_c dostaneme po úpravách odvozením vztah pro novou ohybovou únosnost

$$M_{pl,Rd,N} = M_{pl,Rd} + (x-1) \cdot A_a \cdot f_{yd} \cdot h_c \quad (7)$$

kde parametr $x = h_{c,N} / h_c$, kde $h_{c,N}$ je nová výška betonové desky.

Při změně charakteristické pevnosti betonu v tlaku f_{ck} získáme po úpravách vztah pro novou únosnost

$$M_{pl,Rd,N} = M_{pl,Rd} - \left(\frac{1}{x} - 1 \right) \cdot \frac{A_a^2 \cdot f_{yd}^2}{2 \cdot 0,85 \cdot b_{eff} \cdot f_{cd}} \quad (8)$$

kde parametr $x = f_{ck,N} / f_{ck}$, kde $f_{ck,N}$ je charakteristická pevnost v tlaku nově použitého betonu.

Při změně meze kluzu f_y ocelového profilu dostaneme úpravami odvozený vztah pro novou únosnost

$$M_{pl,Rd,N} = M_{pl,Rd} + (x-1) \cdot A_a \cdot f_{yd} \cdot h_c + (x-1) \cdot A_a \cdot f_{yd} \cdot \frac{h_a}{2} - (x^2-1) \cdot \frac{A_a^2 \cdot f_{yd}^2}{2 \cdot 0,85 \cdot b_{eff} \cdot f_{cd}} \quad (9)$$

kde parametr $x = f_{y,d,N} / f_{yd}$, kde $f_{y,d,N}$ je mez kluzu nově použité oceli.

Při změně ocelového profilu typu IPE dojde ke změně jak celkové plochy průřezu A_a , tak výšky profilu h_a . Po úpravách odvodíme vztah pro novou ohybovou únosnost

$$M_{pl,Rd,N} = M_{pl,Rd} + (x-1) \cdot A_a \cdot f_{yd} \cdot h_c + (x-1) \cdot A_a \cdot f_{yd} \cdot \frac{h_a}{2} + (y-1) \cdot A_a \cdot f_{yd} \cdot \frac{h_a}{2} + (x-1) \cdot (y-1) \cdot A_a \cdot f_{yd} \cdot \frac{h_a}{2} - (x^2-1) \cdot \frac{A_a^2 \cdot f_{yd}^2}{2 \cdot 0,85 \cdot b_{eff} \cdot f_{cd}} \quad (10)$$

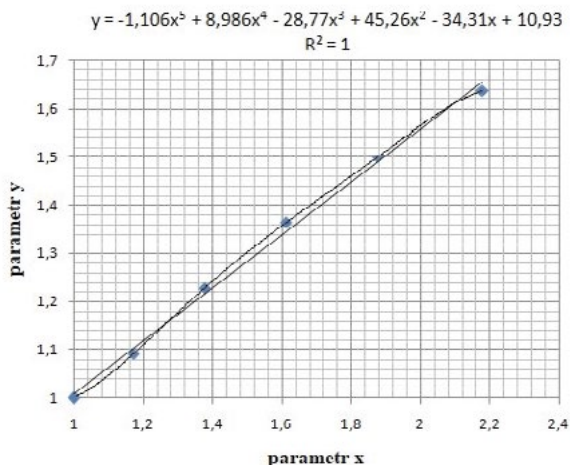
kde parametr $x = A_{a,N} / A_a$ a parametr $y = h_{a,N} / h_a$, kde $A_{a,N}$ je průřezová plocha nového IPE profilu a $h_{a,N}$ jeho výška.

Tyto odvozené rovnice byly dále ověřeny pomocí tabulkového procesoru na konkrétních případech.

4 VÝSLEDKY

Jako základní vzorek pro parametrickou studii byl zvolen prostě podepřený ocelobetonový sprážený nosník délky 8 m. Průřez byl tvořen betonovou deskou o efektivní šířce b_{eff} 2 000 mm a výšce h_c 80 mm z betonu pevnostní třídy C 20/25 a profilem IPE 200 z oceli S 235.

Jelikož změna IPE profilu vyvolá změnu jak plochy ocelového průřezu, tak jeho výšky a tím polohy těžiště profilu, bylo nutné najít určitou závislost mezi těmito dvěma parametry x a y , aby mohla být nadále porovnána ohybová únosnost v závislosti pouze na jednom parametru x , který vyjadřuje procentuální nárůst jedné ze 4 sledovaných veličin. Závislost změny plochy na výšce průřezu byla sledována na konkrétních profilech řady IPE od velikosti 200 až po velikost 360 mm. Jejich hodnoty byly vyneseny do grafu a pomocí spojnice trendu byly aproximovány tak, že jsme získali rovnici $y = -1,106x^5 + 8,986x^4 - 28,77x^3 + 45,26x^2 - 34,32x + 10,93$, která určuje přibližnou závislost mezi parametry x a y .

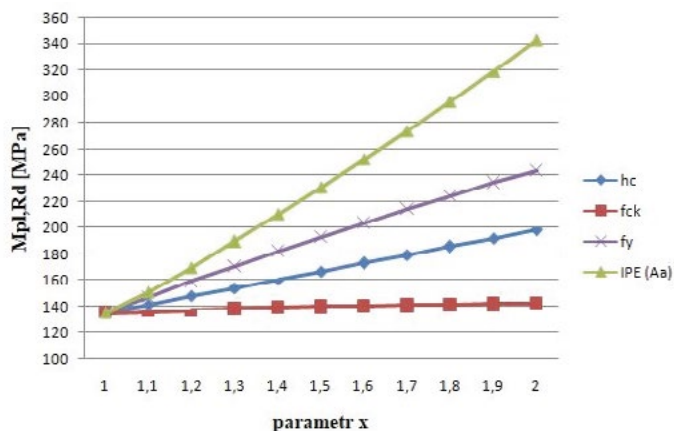


Obr. 2 Vzájemná závislost změny poměru plochy (parametr x) a výšky (parametr y) IPE profilu.

Pomocí tabulkového procesoru byla provedena parametrická studie, kdy byl do vztahů (7), (8), (9) a (10) dosazován parametr x tak, že sledoval vývoj momentové únosnosti při růstu sledovaných veličin po desítkách procent od hodnot u původního nosníku až do zdvojnásobení daného parametru. Hodnoty ohybové únosnosti byly vyčísleny jak v MPa, tak bylo i zjištěno o kolik procent se ohybová únosnost navýší oproti únosnosti základního nosníku.

Tab. 1 Hodnota ohybové únosnosti v MPa v závislosti na nárůstu parametru x , udávajícího poměr nové hodnoty sledovaných parametrů ku původní hodnotě.

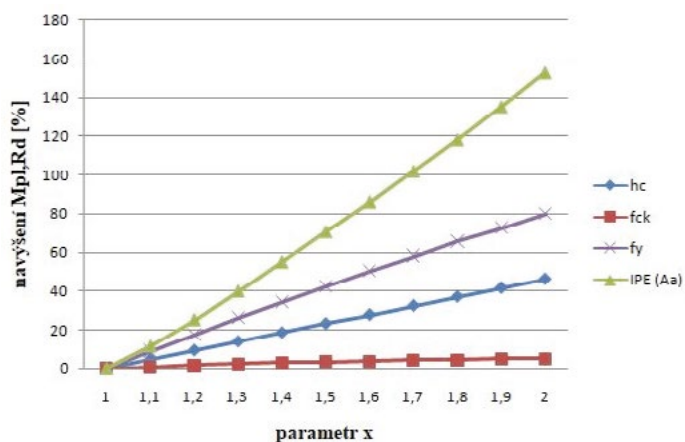
x	$M_{pl,Rd,N}$ pro změnu h_c	$M_{pl,Rd,N}$ pro změnu f_{ck}	$M_{pl,Rd,N}$ pro změnu f_y	$M_{pl,Rd,N}$ pro změnu IPE
1,0	135,432	135,432	135,432	135,432
1,1	141,705	136,665	147,483	150,890
1,2	147,979	137,693	159,262	169,523
1,3	154,252	138,562	170,770	189,512
1,4	160,526	139,308	182,008	210,147
1,5	166,800	139,953	193,974	231,039
1,6	173,073	140,519	203,668	252,123
1,7	179,347	141,017	214,091	273,591
1,8	185,620	141,461	224,243	295,756
1,9	191,894	141,857	234,124	318,853
2,0	198,167	142,214	243,733	342,761



Obr. 3 Graf ohybové únosnosti v závislosti na parametru x.

Tab. 2 Procentuální nárůst ohybové únosnosti oproti základnímu vzorku v závislosti na nárůstu parametru x, udávajícího poměr nové hodnoty sledovaných parametrů ku původní hodnotě.

x	$M_{pl,Rd,N}$ pro změnu h_c	$M_{pl,Rd,N}$ pro změnu f_{ck}	$M_{pl,Rd,N}$ pro změnu f_y	$M_{pl,Rd,N}$ pro změnu IPE
1,0	0,00	0,00	0,00	0,00
1,1	4,63	0,91	8,89	11,41
1,2	9,26	1,67	17,60	25,17
1,3	13,90	2,31	26,09	39,93
1,4	18,53	2,86	34,39	55,17
1,5	23,16	3,34	42,49	70,59
1,6	27,79	3,76	50,38	86,16
1,7	32,43	4,12	58,08	102,01
1,8	37,06	4,45	65,58	118,38
1,9	41,69	4,74	72,87	135,43
2,0	46,32	5,09	79,97	153,088



Obr. 4 Graf znázorňující o kolik procent se navýší ohybová únosnost v závislosti na parametru x.

5 DISKUZE

Už z rovnic (7), (8), (9) a (10) je na první pohled patrné, které členy výpočtu ovlivní změna některé z pozorovaných vstupních veličin, např. porovnáním vztahu (7) pro změnu výšky betonové desky a vztahu (9) pro změnu pevnosti oceli je zřejmé, že změna meze kluzu navýší hodnotu původní ohybové únosnosti více než změna dimenze desky. Z rovnic jsme tedy schopni zjistit, že dominantní vliv pro výpočet má změna ocelového profilu, kde dochází, ke změně plochy průřezu i jeho výšky a tím polohy těžiště. Naopak nejmenší vliv vyvolá změna pevnostní třídy betonu, kde parametr x vystupuje v rovnici (8) ve jmenovateli zlomku a tím dochází pouze k velice pozvolnému nárůstu únosnosti.

Na hodnotách prezentovaných v grafu na Obr. 1 je ukázán vliv zvětšování sledovaných proměnných po desítkách procent od základního vzorku. Zatímco změna pevnosti betonu v tlaku vyvolá pouze zanedbatelné navýšení únosnosti, změnou výšky betonové desky dosáhneme již podstatného zlepšení. Druhým nejlépe vyhodnoceným parametrem byla změna pevnosti oceli a největšího nárůstu dosáhneme změnou ocelového profilu IPE.

Z hodnot prezentovaných v Tab. 2 a znázorněných v grafu na Obr. 4 je vidět o kolik procent se navýší ohybová únosnost oproti základnímu vzorku. Při použití vyšších pevností betonu se bavíme o nárůstu v jednotkách procent. Při změně tloušťky betonové desky či materiálu IPE profilu dochází k nárůstu v desítkách procent, a tím že změna oceli vyvolá téměř dvojnásobné navýšení oproti změně dimenze betonové desky a s narůstající hodnotou parametru x tento rozdíl pozvolně klesá. A při změně ocelového profilu můžeme už při 70% navýšení plochy průřezu dosáhnout dvojnásobné únosnosti. Volba většího průřezu má největší vliv na ohybovou únosnost a s rostoucím parametrem x se zvětšuje.

6 ZÁVĚR

Výsledky studie dokázaly, že dominantní vliv na ohybovou únosnost má ocelový profil, kterým je spřažená konstrukce tvořena. Primární vliv má velikost zvoleného profilu a sekundární volba pevnostní třídy oceli. Oproti tomu výška betonové desky má o poznání menší vliv a pevnost betonu v tlaku téměř zanedbatelný. Tato studie se zaměřovala pouze na ohybovou únosnost a nebylo uvažováno s kombinací s dalšími typy namáhání. Stejně tak nebylo přihlíženo k meznímu stavu použitelnosti, kde změna dimenze ať betonové desky či ocelového profilu vyvolá zvětšení světlého rozměru nosníku, navýšení jeho hmotnosti a tuhosti nosníku. Těmito vlivy se bude zabývat další výzkum.

Poděkování

Príspevek byl vypracován v rámci řešení projektu Specifického vysokoškolského výzkumu na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně č. FAST-J-20-6430.

Použitá zdroje

- [1] ČSN EN 1994-1-1: Eurokód 4: Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, Praha: Český normalizační institut; 2006.
- [2] ČSN EN 1992-1-1: Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, Praha: Český normalizační institut; 2006.
- [3] ČSN EN 1993-1-1: Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, Praha: Český normalizační institut; 2006.
- [4] UY, B., Applicatoins, behaviour and construcion of high performance steel in steel-concrete composite structures, 12th International Conference on Advances in Steel –Concrete Composite Structures, Universitat Politecnica de Valencia, Spain ASCCS 2018, <http://dx.doi.org/10.4995/ASCCS2018.2018.8375>.
- [5] PREETHA, V., SENTHILKUMAR, V., KALAIVANI, K., NAVANEETHA, S., DeformationStudies on Steel-ConcreteComposite T BeamSection, International Conference on Materials, Manufacturing and Machining 2019, AIP ConferenceProceedings 2128, 2019, <http://doi.org/10.1063/1.5117937>.

PARAMETRICKÁ STUDIE ODOLNOSTI DŘEVOBETONOVÝCH SPŘAŽENÝCH NOSNÍKŮ

PARAMETRICAL STUDY OF TIMBER-CONCRETE COMPOSITE BEAMS RESISTANCE

Jan Břečka^{*1}, Kristýna Hrabovská^{**1}

*brecka.j@fce.vutbr.cz

**hrabovska.k@fce.vutbr.cz

¹FAKULTA STAVEBNÍ - Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, Bmo 602 00

Abstrakt

Cílem této studie je nalézt závislosti mezi rozpětím spřaženého dřevobetonového nosníku a dalšími zvolenými parametry spřažených dřevobetonových nosníků. Pro analýzu bylo použito jehličnaté dřevo kategorie C24 a beton třídy C25/30 a C30/37 tloušťky 50 mm. Jako spřahovací prvky byly zvoleny vruty SFS Intec. Pro výpočet byla použita návrhová metoda založená na teorii lineární pružnosti. Poddajnost spřažení byla zohledněna součinitelem poddajnosti γ (γ -metoda).

Klíčová slova

Dřevobetonové spřažené nosníky, mezní stavy, parametrická studie

Abstract

The aim of this study is to find the dependence between the span and cross section area and other choose parameters of the timber-concrete composite beams. For analysis, we used coniferous wood C24 category and concrete C25/30 and C30/37 class with 50 mm thickness. We set the SFS Intec coupling elements. For calculation was used linear elasticity design method. Pliability of composite was take into account per γ -coefficient (γ -method).

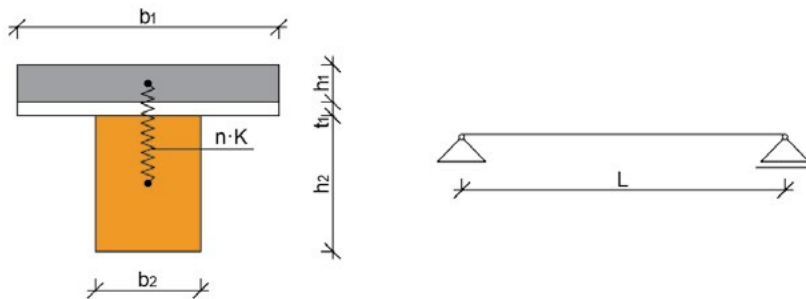
Key words

Timber-concrete composite beams, limit states, parametrical study

1 ÚVOD

Dřevobetonové spřažené konstrukce se používají především pro zesilování stávajících stropů s dřevěnými stropními nosníky. Velkou perspektivu mají v případě dřevobetonových stropů vícepodlažních dřevostaveb. Použitím těchto kompozitních konstrukcí se výrazně zvyšuje tuhost, únosnost, kročejová a vzduchová neprůzvučnost stropní konstrukce a také její požární odolnost. Pokud jsou pro spřažení dřevěných prvků s betonovými prvky použity mechanické spojovací prostředky, je již tato problematika zapracována do skupiny evropských norem ČSN EN. Výpočet provedený dle norem ČSN EN je samozřejmě konzervativní a tuhost spřahovacích prostředků je cca o 20 % nadhodnocována, protože norma předpokládá, že spřahovací prostředek je v betonu dokonale vetknut a při zatížení nedochází k jeho zatlačení do betonu. Pokud se předpokládá, že se spojovací prostředek kolíkového typu ve spoji dřevo-beton s mezivrstvou deformuje, je tento spojovací prvek namáhán také osovou silou, která vzniká od jeho ohybu a ukotvení do dřeva a betonu. Tato osová síla k sobě bude přitlačovat betonovou desku a dřevěný nosník a zvyšuje tak únosnost spojovacího prostředku. Na zvýšení únosnosti spojovacího prostředku se také podílí složka osové síly ve skloněné části spojovacího prostředku, působící rovnoběžně se spárou mezi dřevem a betonem [3],[4].

Předmětem studie jsou čtyři sady dřevobetonových nosníků, které mají proměnné rozpětí, 2 různé průřezy nosníků a 2 různé třídy betonu. Typ spřahovacích prvků a působící zatížení nejsou měněny. Typický řez dřevobetonovým nosníkem je na obr. 1. Při výpočtu byla respektována veškerá ustanovení uvedená v normě ČSN EN 1995-1-1 v odst. B.2 přílohy B k Eurokódu 5 [1] a veškerá ustanovení uvedená v normě ČSN EN 1992-1-1 [2].



Obr. 1 Geometrie spřaženého dřevobetonového nosníku s proměnnými parametry.

Neměnné parametry: 1) Bednění OSB tl. 18 mm, 2) Spřahovací prvky ASSY plus VG 8x220, 3) Zatížení vl. tíhou, ost. stálé 1 kN/m² a proměnné zatížení 1,5 kN/m².

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

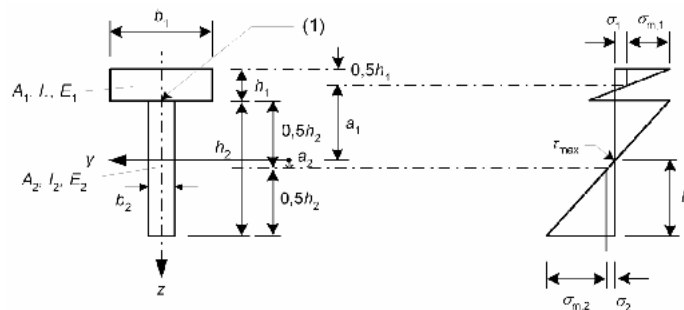
Trend používání dřeva a betonu pro navrhování kompozitních stavebních prvků lze sledovat jak v mostním tak pozemním stavitelství, které optimálně využívají vlastností dřeva a betonu. Problém při navrhování dřevobetonových konstrukcí je v tom, že neexistují žádná obecně platná pravidla nebo normy pro navrhování (aktuálně platná norma [1] je použitelná pouze pro návrh prostých nosníků z kompozitních materiálů) a současně neexistují metodiky pro výpočet spřažených dřevobetonových nosníků s mezivrstvou např. z OSB desek, které by zohledňovaly reálnější např. tření mezi těmito plochami a přidavné namáhání spřahovacích prvků v této vrstvě.

V rámci mnoha experimentálních prací zabývajících se zkouškami dřevobetonových nosníků je sledováno chování při použití normálního betonu C25/30. Po porovnání s výsledky získanými výpočtem podle Eurokódu 5, je hodnocena možnost použití konstrukčního standardu i pro betony vyšších pevností.

3 METODIKA

Po zvolení počátečního průřezu dřevěného prvku a tloušťky betonové desky je určena spolupůsobící část betonu dle normy [2]. Zatížení je známo dle projektové dokumentace a požadavků investora a volba spřahovacích prostředků je již na projektantovi. Dřevobetonový spřažený nosník je nutné posoudit na počátku životnosti a na konci životnosti, neboť ve dřevě probíhají časově závislé změny mechanických vlastností. V betonu rovněž probíhají různé reologické procesy. Posudek předpokládá, že normálová napětí mají po výšce striktně lineární charakter, viz obr. 2. Návrhová metoda je tedy založena na teorii lineární pružnosti a na následujících předpokladech:

- nosníky jsou prostě podepřeny
- jednotlivé části (beton a dřevo) jsou spojeny mechanickými spojovacími prostředky s modulem prokluzu K
- rozeč mezi spojovacími prostředky je konstantní nebo se stejnoměrně mění podle posouvající síly
- zatížení působí ve směru osy z a vyvozuje moment $M = M(x)$ s průběhem ve tvaru sinusoidy nebo paraboly



Obr. 2 Průběh normálových napětí po výšce průřezu [1].

Účinná ohybová tuhost je uvažována dle vztahu (1)

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^2 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad (1)$$

kde E je modul pružnosti v tahu a tlaku betonového nebo dřevěného prvku, I je moment setrvačnosti betonového nebo dřevěného prvku, γ je součinitel poddajnosti, A je průřezová plocha prvku, a je vzdálenost od těžiště celého průřezu do středu dřevěného nebo betonového prvku.

Normálová napětí v betonovém prvku jsou vypočítána dle vztahů (2) a (3). a_1 je vypočítáno dle (4) a označuje vzdálenost mezi těžištěm celého průřezu a středem dřevěného nosníku. h_1 je vypočítáno dle (5) a označuje vzdálenost mezi těžištěm celého průřezu a středem betonového nosníku.

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot a_1 \cdot M_{Ed}}{(EI)_{eff}} \quad (2)$$

$$\sigma_{m,1} = \frac{0,5 \cdot E_1 \cdot h_1 \cdot M_{Ed}}{(EI)_{eff}} \quad (3)$$

$$a_2 = \frac{0,5 \cdot \gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot (h_1 + 2 \cdot t_i + h_2)}{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 + \gamma_2 \cdot E_2 \cdot A_2} \quad (4)$$

$$a_1 = 0,5 \cdot (h_1 + 2t_i + h_2) - a_2 \quad (5)$$

Napětí v horních vláknech betonu jsou porovnána s návrhovou pevností betonu v tlaku (6).

$$\sigma_{c,t} = -\sigma_1 - \sigma_{m,1} \leq f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (6)$$

Napětí ve spodních vláknech betonu jsou porovnána s návrhovou pevností betonu v tahu (7).

$$\sigma_{c,b} = -\sigma_1 + \sigma_{m,1} \leq f_{ctd} = \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \quad (7)$$

Normálová napětí v dřevěném prvku jsou vypočítána dle vztahů (8) a (9).

$$\sigma_2 = \frac{\gamma_2 \cdot E_2 \cdot a_2 \cdot M_{Ed}}{(EI)_{eff}} \quad (8)$$

$$\sigma_{m,2} = \frac{0,5 \cdot E_2 \cdot h_2 \cdot M_{Ed}}{(EI)_{eff}} \quad (9)$$

Napětí v horních a spodních vláknech dřevěného prvku jsou vyjádřena pomocí vztahů (10) a (11).

$$\sigma_{t,top} = \sigma_2 - \sigma_{m,2} \quad (10)$$

$$\sigma_{t,b} = \sigma_2 + \sigma_{m,2} \quad (11)$$

Následně je vypočítána návrhová pevnost dřevěného prvku v ohybu a návrhová pevnost dřevěného prvku v tahu dle vztahů (12) a (13).

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (12)$$

$$f_{t,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad (13)$$

A toto kombinované namáhání je posouzeno s limitními požadavky dle vztahu (14).

$$\frac{\sigma_2}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,2}}{f_{m,d}} \leq 1,0 \quad (14)$$

Při návrhu spráženého dřevobetonového nosníku musí být posouzena smyková únosnost dřeva dle vztahu (15).

$$\tau_{2,max} = \frac{0,5 \cdot E_2 \cdot h_2^2}{(EI)_{eff}} \cdot V_{Ed} \leq f_{v,d} = k_{mod} \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (15)$$

Zatížení na spojovací prostředky mezi betonovou deskou a dřevěným nosníkem je vypočítáno dle vztahu (16),

$$F_1 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 a_1 s_1}{(EI)_{eff}} \cdot V_{Ed} \leq F_{Rd} = n_{eff} k_{mod} \frac{F_{Rk}}{\gamma_M} \tag{16}$$

kde s_1 je osová vzdálenost mezi spojovacími prostředky a n_{eff} je efektivní počet spřahovacích prostředků v řadě.

Procedurou uvedenou výše je vyšetřen mezní stav únosnosti (MSÚ) spřahovaných dřevobetonových nosníků na počátku životnosti. Obdobným způsobem se vyšetří MSÚ spřahovaných dřevobetonových nosníků na konci životnosti. Jediným rozdílem v těchto výpočtech je, že se uvažují rozdílné moduly pružnosti v tahu a tlaku E obou materiálů (je uvažováno s reologickými vlastnostmi obou materiálů) a rozdílné moduly prokluzu spřahovacích prostředků

V posledním kroku je potřeba vyšetřit limitní průhyby spřahovaných dřevobetonových konstrukcí, čili posoudit mezní stav použitelnosti (MSP).

MSP na konci životnosti je vypočítán ve dvou krocích. V prvním kroku je vypočítán průhyb od stálých zatížení a kvazistálé složky proměnného zatížení dle vztahu (17)

$$f_{qp} = g_{0,k} + g_{1,k} + \psi_2 q_k \tag{17}$$

kde $g_{0,k}$ je vlastní tíha spřahového nosníku, $g_{1,k}$ je ostatní stálé zatížení a $\psi_2 q_k$ je kvazistálá složka proměnného zatížení.

Od tohoto zatížení je vypočítán průhyb nosníku dle vztahu (18)

$$w_{qp} = \frac{5}{384} \cdot \frac{f_{qp} \cdot L^4}{(EI)_{eff,fin}} \tag{18}$$

Ve druhém kroku je vypočítán průhyb od zbylého kvazistálého proměnného zatížení, viz vztahy (19) a (20).

$$f_q = (1 - \psi_2) q_k \tag{19}$$

$$w_q = \frac{5}{384} \cdot \frac{f_q \cdot L^4}{(EI)_{eff,inst}} \tag{20}$$

Celkový průhyb nosníku dostaneme sečtením výše uvedených průhybů (21).

$$w_{fin} = w_{qp} + w_q \leq \frac{L}{200} \tag{21}$$

Tab. 1 První sada nosníků (nosník 140x180 - C24, beton C25/30, osová vzdálenost 0,8 m).

L [m]	Počátek životnosti					Konec životnosti				
	$\sigma_{ct} / \sigma_{cd}$	$\sigma_{c,b} / f_{ctd}$	$\tau_{2,max} / f_{v,d}$	$F_1 / F_{R,d}$	w / w_{lim}	$\sigma_{ct} / \sigma_{cd}$	$\sigma_{c,b} / f_{ctd}$	$\tau_{2,max} / f_{v,d}$	$F_1 / F_{R,d}$	w / w_{lim}
2,4	0,12	1,49	0,09	0,57	0,10	0,08	0,87	0,09	0,62	0,13
2,8	0,16	1,94	0,10	0,87	0,15	0,11	1,11	0,11	0,94	0,19
3,2	0,18	1,68	0,11	0,85	0,16	0,12	0,84	0,12	0,90	0,21
3,6	0,20	1,43	0,12	0,81	0,18	0,14	0,59	0,13	0,84	0,23
4,0	0,23	1,53	0,14	0,96	0,23	0,16	0,57	0,14	0,99	0,30

Tab. 2 Druhá sada nosníků (nosník 140x180 - C24, beton C30/37, osová vzdálenost 0,8 m).

L [m]	Počátek životnosti					Konec životnosti				
	$\sigma_{ct} / \sigma_{cd}$	$\sigma_{c,b} / f_{ctd}$	$\tau_{2,max} / f_{v,d}$	$F_1 / F_{R,d}$	w / w_{lim}	$\sigma_{ct} / \sigma_{cd}$	$\sigma_{c,b} / f_{ctd}$	$\tau_{2,max} / f_{v,d}$	$F_1 / F_{R,d}$	w / w_{lim}
2,4	0,11	1,44	0,09	0,59	0,10	0,07	0,84	0,10	0,65	0,13
2,8	0,14	1,80	0,10	0,86	0,15	0,09	1,03	0,11	0,93	0,19
3,2	0,15	1,57	0,11	0,85	0,16	0,10	0,79	0,12	0,90	0,21
3,6	0,17	1,34	0,12	0,81	0,18	0,12	0,57	0,13	0,84	0,23
4,0	0,20	1,43	0,14	0,96	0,23	0,14	0,55	0,14	0,99	0,30

Tab. 3 Třetí sada nosníků (nosník 200x200 - C24, beton C25/30, osová vzdálenost 1,5 m).

L [m]	Počátek životnosti					Konec životnosti				
	$\sigma_{ct} / \sigma_{cd}$	$\sigma_{c,b} / f_{ctd}$	$\tau_{2,max} / f_{v,d}$	$F_1 / F_{R,d}$	w / w_{lim}	$\sigma_{ct} / \sigma_{cd}$	$\sigma_{c,b} / f_{ctd}$	$\tau_{2,max} / f_{v,d}$	$F_1 / F_{R,d}$	w / w_{lim}
4,4	0,23	1,11	0,16	0,96	0,24	0,17	0,25	0,17	0,98	0,30
4,8	0,26	1,09	0,19	0,98	0,29	0,20	0,15	0,19	0,99	0,37
5,2	0,30	1,05	0,22	0,94	0,36	0,23	0,02	0,22	0,95	0,46
5,6	0,35	1,05	0,25	0,95	0,43	0,27	0,09	0,25	0,96	0,56
6,0	0,38	0,91	0,27	0,82	0,51	0,30	0,29	0,27	0,82	0,66

Tab. 4 Čtvrtá sada nosníků (nosník 200x200 - C24, beton C30/37, osová vzdálenost 1,5 m).

L [m]	Počátek životnosti					Konec životnosti				
	$\sigma_{ct} / \sigma_{cd}$	$\sigma_{c,b} / f_{ctd}$	$\tau_{2,max} / f_{v,d}$	$F_1 / F_{R,d}$	w / w_{lim}	$\sigma_{ct} / \sigma_{cd}$	$\sigma_{c,b} / f_{ctd}$	$\tau_{2,max} / f_{v,d}$	$F_1 / F_{R,d}$	w / w_{lim}
4,4	0,19	1,01	0,16	0,95	0,23	0,14	0,23	0,17	0,96	0,30
4,8	0,22	1,01	0,19	0,98	0,29	0,17	0,14	0,19	0,99	0,37
5,2	0,26	0,99	0,22	0,95	0,35	0,19	0,04	0,22	0,96	0,46
5,6	0,29	0,99	0,25	0,91	0,43	0,22	0,06	0,25	0,92	0,56
6,0	0,33	0,96	0,27	0,90	0,51	0,25	0,18	0,27	0,91	0,66

4 ZÁVĚR

Byla provedena studie odolnosti spřažených dřevobetonových nosníků pro rozpětí 2,4-6,0 m. Byl sledován vliv třídy betonu na mezní stav únosnosti (MSÚ) a mezní stav použitelnosti (MSP) těchto sad nosníků. Ve všech sadách byla použita betonová deska tloušťky 50 mm, byly rovněž použity sprahovací vruty ASSY plus VG 8x220 a bylo aplikováno stejné zatížení. Stálé zatížení bylo uvažováno hodnotou 1 kN/m² a užité hodnotou 1,5 kN/m² (jako pro obytné místnosti). Všechny sady byly optimalizovány vždy na maximální využití sprahovacích prostředků. Jako impuls pro využití dřevobetonových nosníků, kdy má jejich použití již význam, byla vnímána deformace na konci životnosti větší než 50 % limitní hodnoty. Do této hodnoty má význam použití nespřažených konstrukcí, pokud není potřeba užít betonových desek ke zvýšení požární odolnosti konstrukce.

V rámci parametrické studie bylo zjištěno, že třída betonu výrazně neovlivňuje pevnost spřažené dřevobetonové konstrukce. Tahová napětí v betonu musí být v každém případě zachycena betonářskou výztuží (KARI sítěmi). Osová vzdálenosti spřažených nosníků je možné volit, při působení běžných zatížení, větší než 1,5 m. Spřažené dřevobetonové nosníky je vhodné navrhovat, při běžných zatíženích, od rozpětí 5,5 m a více.

Poděkování

Příspěvek byl vypracován v rámci řešení úloh začleněných do projektu specifického vysokoškolského výzkumu GA VUT č. FAST-J-20-6375.

Literatura

- [1] ČSN EN 1995-1-1 *Navrhování dřevěných konstrukcí. Část 1.1: Obecná pravidla - Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČAS, 2006.
- [2] ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 *Navrhování betonových konstrukcí. Část 1.1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČAS, 2019.
- [3] DIAS, A., SCHÄNZLIN, J., DIETSCH, P. *Design of timber-concrete composite structures*. Germany: Shaker Verlag GmbH, Aachen, 2018, 228 s.
- [4] FELIPI, P., DAMASCENO, F., EMERSON, F. *Analysis of the mechanical behavior of timber-concrete composite beams through FEM model*. Brasil: Av. Trabalhador Sao-Carlense, Sao Paulo, 2017, 16 s.

FLEXURAL TESTS OF LIGHTENED BEAMS

OHYBOVÉ TESTY VYLAHČENÝCH NOSNÍKOV

Patricia Vaňová^{*,1}, Vincent Kvočák¹

*patricia.vanova@tuke.sk

¹Technical University of Košice, Vysokoškolská 4, 042 00 Košice, Slovakia

Abstrakt

Spriahovacie prvky sú relatívne nový vynález (osemdesiate roky minulého storočia) a teda stále ostáva veľa priestoru pre ďalší vývoj. Na Technickej univerzite v Košiciach, Stavebnej fakulte, boli vyvinuté dva nové dizajny spriahovacích pásov. Boli prevedené ohybové testy spriahnuých nosníkov, aby sa preukázala ich vhodnosť využitia ako mostov s krátkym rozpätím. V tomto článku sú stručne popísané dané návrhy, ako aj proces testovania a sú uvedené výsledky testov.

Kľúčové slová

Kompozit, most, spriahovací prvok

Abstract

Continuous shear connectors are a relatively new invention (from eighties of the last century), and therefore there is still a lot of space for development. At Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, two new designs of the strips were developed. Flexural tests of composite beams were performed to prove the further possibility of their use as short-span bridges. In this article, the designs as well as the process of testing are briefly described and the test results are presented.

Key words

Composite, bridge, shear connector

1 INTRODUCTION

Composite bridges and specifically continuous shear connectors have been a main topic of several researchers around the world in the several past decades. One of the first researches that set the direction for this area was committed by Hosain and Oguejiofor [1]. They established the difference between the shear connector and the shear stud and proved the suitability of the steel strip by series of testing and FEM analysis made in ANSYS software [2].

In Poland the so-called 'Precobeam' was developed. It is a composite beam with embedded shear connectors with a dowel shape. Lorance et al. did a research focused on the shape of the dowel, and suggested a dowel with sharp corners, which eased the process of disassembling two strips made out of one I-beam [3][4]. Precobeam bridges are popular in Germany, where several were already built [5].

2 CONTINUOUS SHEAR CONNECTORS

Two new designs were proposed. Both were made out of HEA 200 cutted longitudinally. First strip had a shape of puzzle teeth (visible in Fig. 1 left). Second strip had holes with 20 mm of diameter (through which, the 12 mm diameter transverse reinforcement bars in beams could pass) 300 mm apart from each other and approximately in the middle of the strip by its height. To add the shear resistance on top of the shear concrete studs created in the holes, the curved reinforcement was welded onto the connector above the holes from its both sides (see Fig. 1). The first one, puzzleoid, design was marked as NV1, and the second designed, with the welded curved reinforcement bars, was marked as NV2 during the experimental study.



Fig. 1 NV1 (left) and NV2 (right).

3 LIGHTENED BEAMS

At first, the shear connectors were embedded into a bridge beam with rectangle cross-section. Shortly after, it was clear that there are unnecessary sections of concrete, where the tension stress was dominant. By removing those sections, a new design of composite beam was born. It uses less material and it is therefore more effective. As these bridge beams are developed for prefabrication, the construction process stays simple.

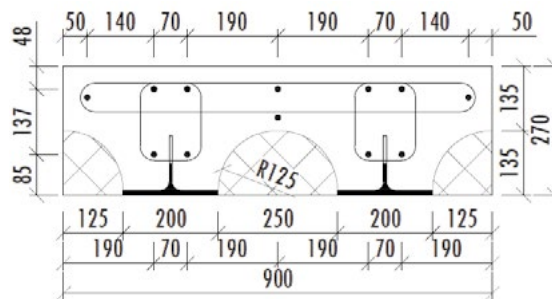


Fig. 2 Cross-section of the lightened beams.

In the Fig. 2 the cross-section of the beams is presented, with removed sections hatched in the size of a circle with 250 mm diameter. The reinforcement cage is also visible, comprised of two transverse stirrups and twelve longitudinal reinforcement bars, each 12 mm in diameter.

4 EXPERIMENTS

At Laboratory of Excellent Research, three four-point flexural tests of each type were performed. The goal was to find out the bonding resistance of the lightened beams and prove their suitability for use in practice. Six meters long beams were made with two longitudinal strips; and placed into hydraulic press, which was pressing a beam in two equal continuous loads, two meters apart from each other. The beams were laid onto two supports, 100 mm away from the beam end faces. The supports limited the beams in vertical movement. To measure wanted values, five inductive displacement sensors were used. Two were placed above the supports, to measure raise of the beam endings, two were placed at the places of loading and one, final, was underneath the middle – to measure the maximum displacement of the beams. For further understanding see Fig. 3.

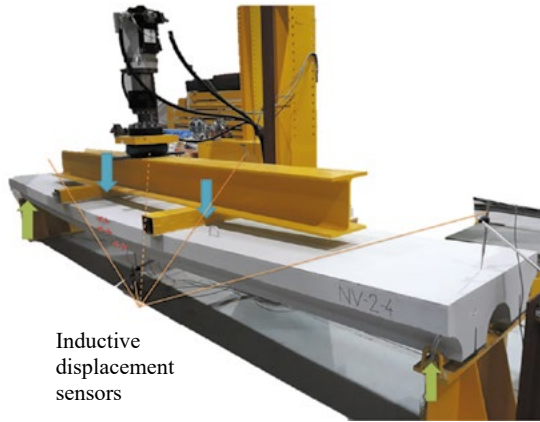


Fig. 3 Layout of a four-point flexural test.

The loading of the beams was done via several loading conditions, which were raised by 25 kN in each loading condition. During the first, linear, loading, the two cycles were done to prove the linear behaviour of the beams. In first cycle, the load was drop and raised repeatedly between 50 kN and 200 kN, during second cycle, it was between 150 kN and 300 kN, so 150 kN range during both cycles. The bonding resistance was established at the end of the first section. All the beams were loaded until they reached the end of the second section of the graph - the elastic-plastic section, after which the beams were unloaded in four loading conditions. After the unloading, the displacement dropped to approximately its half value and crack, that developed on the sides of the beams were partially closed.

During first test of the first beam with puzzle shaped connector (NV1), the middle inductive displacement sensor failed. This is represented by a visible vertical line in the Fig. 4. However, this incident did not affect the results, as the linear part of the graph, where the beam was acting elastically, was already over.

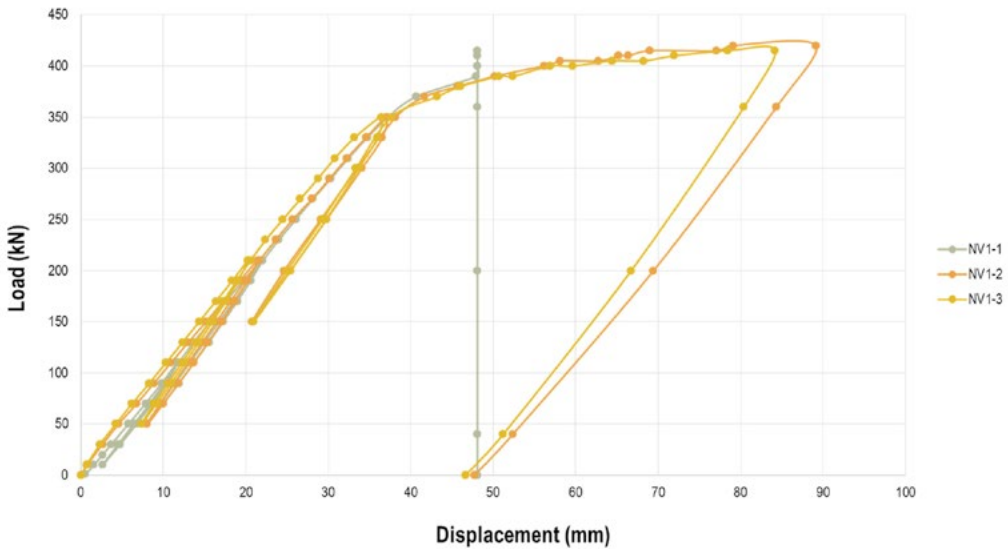


Fig. 4 Results of NV1.

From the Fig. 4 it is clear that the bonding resistance of the NV1 was achieved at the loading condition equal to 350 kN. The bonding resistance of NV2, visible in Fig. 5, was reached at the value of 370 kN.

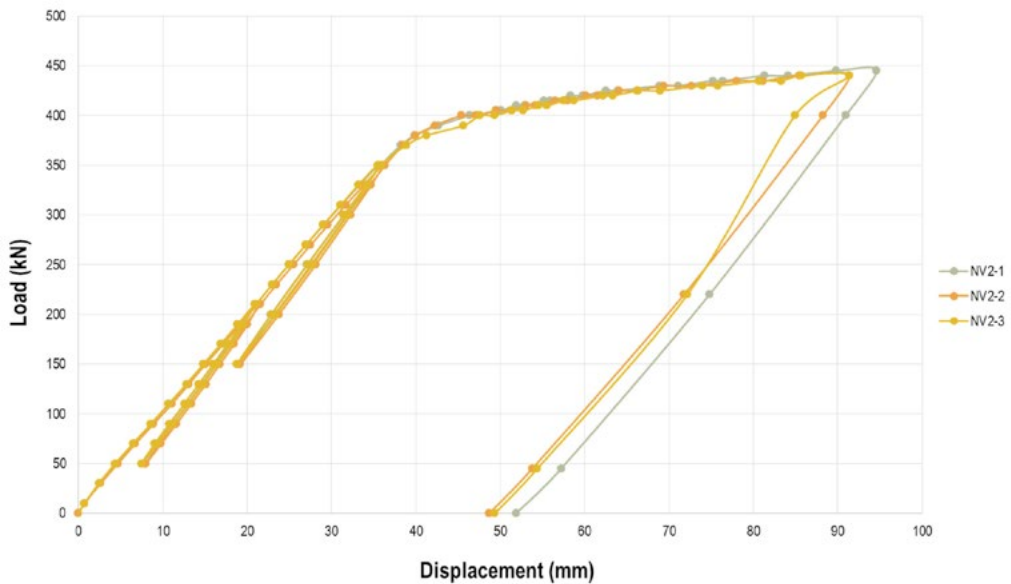


Fig. 5 Results of NV2.

5 CONCLUSION

Both designs of continuous shear connectors proved the bonding resistance suitable for static loading of bridges. The second type (NV2) presented slightly better resistance and therefore could probably perform the same results with lower construction height, which can be useful in many situations. Both types of beams are developed as premanufactured and therefore their construction should not be very difficult.

The fatigue resistance has to be researched as well for proving suitability of dynamic loading of bridges. FEM analysis of experiments presented in these papers is undergoing and the results will be used for further parametric study.

Acknowledgement

The paper has been supported by The projects: VEGA 1/0172/20 "Stress and deformation analysis of load bearing components made out of steel, glass and composite materials" of the Scientific Grant Agency of the Ministry of Education, science, research and sport of the Slovak Republic and the Slovak Academy of Sciences and by the project Slovak Research and Development Agency under the contract No. APVV-15-0486 "Analysis of Shear Connection Influence in Bridges with Encased Beams".

References

- [1] Oguejiofor, E. C. and Hosain, M. U. (1992). Behaviour of perfbond rib shear connectors in composite beams: full-size tests, *Canadian Journal of Civil Engineering* 19: 224 – 235.
- [2] Oguejiofor, E. C. and Hosain, M. U. (1997). Numerical analysis of push-out specimens with perfbond rib connectors, *Computers and Structures* 62: 617–624.
- [3] Lorenc, W. (2009). Boundary approach in shape study of composite dowel shear connector, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 9: 55–66.
- [4] Lorenc, W. (2016). The design concept for the steel part of a composite dowel shear connection, *Steel Construction* 9(2): 89–97.
- [5] Seidl, G., Hoyer, O., Zanon, R., Popa, N., Lorenc, W., Rowiński, S., Kozuch, M., Franssen, J.-M., Fohn, T., Quinchia, J. P., Carrasco, C. H., Farhang, A. and Nüsse, G. (2012). Prefabricated Enduring Composite Beams based on innovative Shear Transmission.

EVALUATION OF THE RELATIVE DENSITY OF RIVER GRAVELS FROM THE RESULTS OF DYNAMIC PENETRATION RESISTANCE

Eliška Kučová^{*,1}

*eliska.kucova@stuba.sk

¹Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Abstract

Before the execution of geotechnical structures, it is necessary to determine the ground conditions of the given area by means of engineering-geological survey. During the survey, various field tests are performed to determine geotechnical properties of soils or rocks necessary for the design of geotechnical structures. In Slovakia, several in-situ tests are used for soil testing including a dynamic penetration test. Using this test selected parameters of coarse-grained soils, such as relative density or angle of shear strength, can be determined. Near Bratislava, dynamic penetration was used to test gravel nearby the Danube river. These results were afterwards used to evaluate the relative density of the gravel layers using the appropriate correlations specified in this article.

Key words

Dynamic penetration test, penetration resistance, river gravels, relative density

1 INTRODUCTION

Various penetration field tests - e.g. standard penetration test (SPT), cone penetration test (CPT), vane test (VT), pressuremeter test (PMT), dilatometer test (DMT) can be used in engineering-geological survey to determine characteristic values of specific geotechnical parameters [1], among which a dynamic penetration is quite popular test used in Slovakia. For example, it is quite often used for preliminary assessment of ground conditions during the road constructions [2], [3]. Moreover, it was used in Slovakia for determination of geotechnical parameters of loess sediments [4] or for assessment of properties of soft rocks [5].

Dynamic penetration (DP) is a relatively simple test designed for testing the soil and soft rock resistance against the penetration of the rod ended with conical tip. The penetration of the rod is induced by the dynamic force created by the impacts of the hammer. According to EN ISO 22476-2 [6] a DP test is divided into four categories regarding the hammer weight (Tab. 1).

Tab. 1 Classification of dynamic penetration test according to the hammer weight.

	DPL (light)	DPM (medium)	DPH (heavy)	DPSH (super-heavy)
Hammer weight	10 ± 0,1	30 ± 0,3	50 ± 0,5	63,5 ± 0,5

During the performance of the DP test number of blows (N_{10} , N_{20}) necessary for rod to penetrate required depth of 10 or 20 cm are recorded. The aim of the test is to measure soil resistance which is expressed by specific dynamic penetration resistance q_{dyn} derived from measured N_{10} , N_{20} results. The DP test is preferably performed in coarse-grained soil due to less friction between soil particles and penetration rod. The rod friction is measured by torsional moment. By means of this test a selected geotechnical parameters of coarse-grained soils, such as relative density (I_D), angle of shear strength (φ_{def}), deformation modulus (E_{def}), bulk density (ρ_d) or porosity (n), can be determined applying proper correlations.

In Europe numerous correlations are used to establish the relation between results of penetration tests and characteristic values of geotechnical parameters. These relations were studied by various authors. Herrik and Jones [7] discusses soil penetration resistance measurements provided by dynamic penetrometer. Langton [8] described the parameters and applications of light weight dynamic penetration test. Vrettos and Papamichael [9] presented comparative study, the applicability and reliability of empirical relationships for various types of probing (CPT, SPT, DPT). Minasny [10] compared the penetration resistance measured by static motor-operated and dynamic penetrometer.

From all available correlations, the most frequent one is between the DP results and relative density of coarse-grained soils. The relative density of coarse-grained soils is in many cases studied and measured by field tests as it is complicated to determine the original relative density of the soil from the sample in laboratory conditions. The cause of it is that many coarse-grained soil samples taken from the field are disturbed and they do not represent the original properties anymore. Additionally, it is possible to estimate other geotechnical parameters [11] based on relative density derived from results of DP test.

Correlations between DP results and relative density are encoded in various European standards, e.g. DIN 4094-3 [12], EN 1997-2 [11], PN-B-04452:2002 [13] or STN 72 1032 [14]. All these standards describe the derivation of relative density from the results of N (number of blows) of different types of dynamic penetration. DIN 4094-3 [12], EN 1997-2 [11] and STN 72 1032 [14] mention correlations for I_D derived from DPL and DPH results. The Polish standard PN-B-04452: 2002 [13] publishes correlations derived from the results of DPL, DPM and DPSH. In Slovakia, in addition to the above, correlations according to Švasta, Obert, Ohde et al. [15] are used. These correlations are derived from the results of the specific dynamic penetration resistance q_{dyn} . Correlations in [14], [15] were originally set up for the heavy dynamic penetration test, which is the most used dynamic penetration in Slovakia. Currently, light and medium dynamic penetrations are used as well, for which very few correlations are available. Therefore, it is necessary to examine whether and under what conditions existing DPH correlations can be applied to the results of other types of dynamic penetration.

2 EXPERIMENT

The aim of the experiment was to determine and analyze the relative density of river gravels from the results of dynamic penetration resistance. The results used for analysis of relative density were obtained from the field testing of fluvial soils with DPM (30kg hammer) and DPH (50kg hammer) near Danube river in Bratislava region. The dynamic penetration testing was performed mostly in gravels. The area of interest was in the once a basin of the Danube river and nowadays, the area represent large repositories of the accumulated coarse-grained materials.

Geology of the locality

The area of interest is in the wider area of the Danube river. In this area, the most represented layers are well-graded (G1 / GW) and poor-graded (G2 / GP) gravels, which alternate with the positions of gravel with a mixture of fine-grained soil (G3 / G-F) or silty gravels (G4 / GM). The examples of grading curves for gravelly soils from observed locality are shown in Fig. 1. The layers of Danube gravels in the wider area of the investigated locality can reach a thickness of 3-13 m. The grains of gravel are smooth, mostly with well-rounded spherical or cylindrical shape with a fraction of 1-5 cm, respectively with a fraction of 5-12 cm which, however, occurs less often [16].

The DPM and DPH dynamic penetration tests, analyzed in this article, were carried out to a depth of 10 meters. These two tests were performed in the same location as close as possible to each other (few tenth of centimeters apart, but not more than 50 cm). As part of the determination of local geological conditions, a borehole was drilled near the penetration tests (Fig. 1). Based on geological investigation, soils were classified in the layers pictured in Fig. 1. The underground water level was measured in the depth of 4 meters below the terrain.

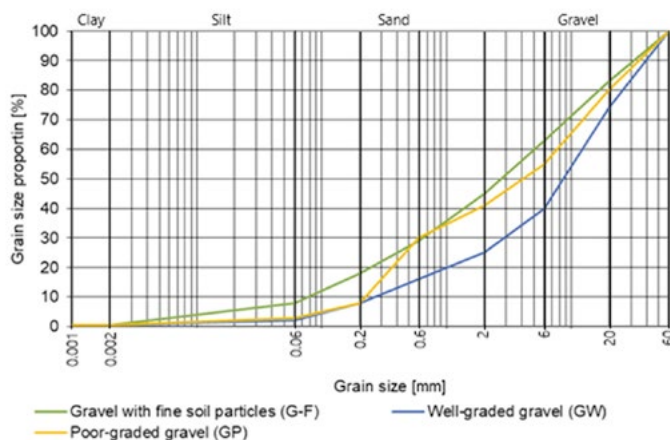


Fig.1 Grading curves of gravelly soils.

Dynamic penetration test results

During the DPH and DPM tests, the number of blows N_{10} was recorded. These results were subsequently recalculated according to EN ISO 22476-2 [6] considering the torsional moment, expressing the skin friction on the rod, and the effect of the groundwater level. From the adjusted N_{10} results, the specific dynamic penetration resistance q_{dyn} was calculated. The results of the dynamic penetration resistance measured by DPH and DPM tests are graphically shown in Fig. 2. Afterwards, average values were expressed from the results of q_{dyn} (MPa) (Tab. 2). Subsequently, using selected correlations, these results were used to derive the relative density of gravel layers. The relative density derived from the results of the relative density index (I_D) was assessed according to the criteria set out in STN 72 1001 [17].

Tab. 2 Results of dynamic penetration resistance.

DP results		Soil layers		
		G2/GP 2,1 - 6,5 m	G3/GF 6,5 - 10,0 m	Gravelly layer 2,1 - 10,0 m
q_{dyn} [MPa]	DPH	13.965	7.601	11.146
q_{dyn} [MPa]	DPM	12.042	6.589	9.626

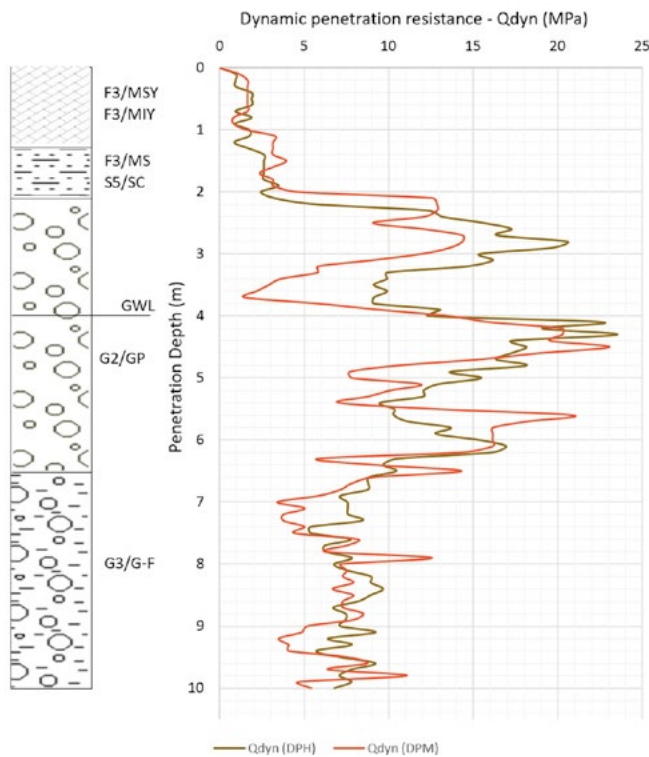


Fig. 2 Geological profile of tested soil (on the left); Results of dynamic penetration resistance (on the right)

3 DETERMINATION OF THE REALTIVE DENSITY

The relative density of coarse-grained soils can be derived from the results of N and q_{dyn} . The measured results of the number of blows (N) are rather indicative, because they do not consider any physical effects on dynamic penetration. Therefore, these results are adjusted for the effect of groundwater level and friction on the rod skin [2]. The results of N can be converted to a specific dynamic penetration resistance q_{dyn} (MPa), which in addition counts in the weight of the penetration system with increasing depth of impact. In the analysis of relative density,

the results q_{dyn} of heavy and medium dynamic penetration (Tab. 2), which were obtained for coarse-grained soil layers (G2 / GP, G3 / G-F), were processed. Specific correlations (Tab. 3, Tab. 4) for determination of relative density were selected with respect to the type tested soil.

First, the empirical correlation according to Švasta [15] was applied to derive the relative density of river gravels. This correlation was originally derived for heavy dynamic penetration. According to this relation, the index of relative density (I_D) can be derived from the results of q_{dyn} , based on which the relative density of coarse-grained soils can be subsequently assessed. When evaluating the relative density from the DPH and DPM test results (Fig.3), the coefficients a , b were chosen analogously to the respective soil (gravelly soils: $a = 0.13$; $b = 0.6$).

Tab. 3 Determination of the relative density according to Švasta.

$$I_D = a * (q_d)^b$$

Soil Type	a	b
Clayey, silty	0,16	0,7
Sand Fine-grained	0,15	0,67
Medium/coarse-grained	0,14	0,63
Gravelly soils, sandy gravels	0,13	0,6

Secondly, the relative density was derived by applying several correlations suitable for gravelly soils (Tab. 4). These correlations were defined from well-established and comparable experience. For these correlations, authors had set certain intervals of values of the specific dynamic penetration resistance, which define different degrees of relative density. Slovak standard STN 72 1032 [14] recommends the relative density assessment of alluvial (river) gravel setting up limit values of 8.5 and 21.5 MPa. Followingly, Obert [15] specified the limit values for poor-graded gravel of 4 MPa and 14 MPa. The soil with $q_{dyn} < 4.0$ MPa is being characterized as loose and soil with $q_{dyn} > 14.0$ MPa is determined as dense. Ohde, Schubert and Haefeli [15] derived a correlation for the relative density of fluvial (river) gravels, where gravels with $q_{dyn} < 5$ MPa have a loose density and gravels with $q_{dyn} > 15$ are defined as dense.

Tab. 4 Correlations for relative density according to various authors.

Relative density derived from q_{dyn} [MPa]				
Reference	Soil Type	Loose	Medium dense	Dense
STN 72 1032	Alluvial (river) gravels	$\leq 8,5$	8,5 - 21,5	$\geq 21,5$
Obert	Poor graded gravel	$< 4,0$	4,0 – 14,0	$> 14,0$
Ohde, Schubert, Haefeli	Fluvial (river) gravels	2,5 – 5,0	$> 5,0 - 10,0$	$> 10,0$

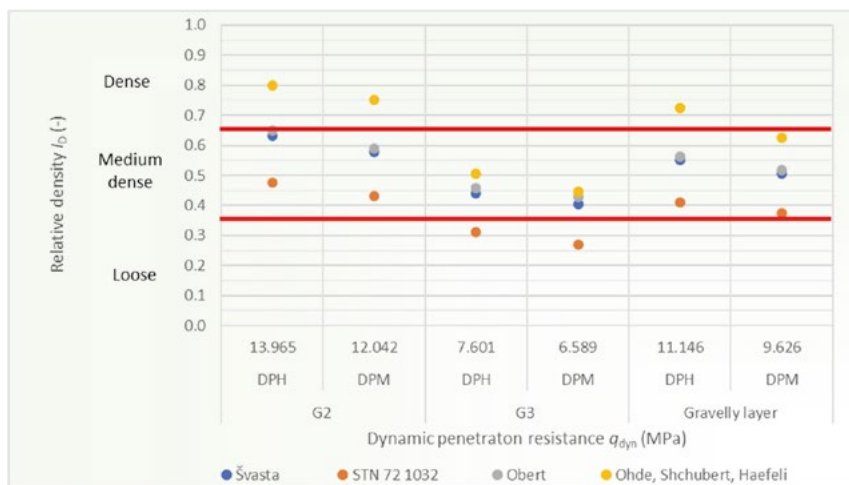


Fig. 3 Relative density of the river gravels.

Relative density was evaluated from the average values of DPM and DPH specific dynamic penetration resistance using above correlations in two ways. First, the relative density was evaluated separately for each layer of gravel (G2 / GP; G3 / G-F). Then, the relative density was calculated for the total gravel layer considering the both types of gravels as one gravelly layer (G2 / GP + G3 / G-F). The results of both evaluation methods are represented in following figure (Fig. 3). This graph considers average results of q_{dyn} measured by DPM and DPH tests (Tab. 2) and point out the differences in relative density evaluation using different correlations.

4 DISCUSSION

In this article, the specific dynamic penetration resistance of DPM and DPH was used to specify the relative density of river gravels. During the relative density assessment various appropriate correlations for gravelly soils were used. As there are no major differences between the results of the DPH and DPM tests, correlations originally derived for DPH can be applied for the DPM test as well. The assessment of relative density (Fig. 3) was divided in two stages. Firstly, the relative density was evaluated separately for poorly graded gravel (G2 / GP), located from 2.1 - 6.5 m bellow terrain, and layer of gravel with fine particles (G3 / G-F), which was situated below the G2 / GP layer from 6.5-10.0 m. Secondly, the G2 / GP and G3 / G-F layers were considered as a total layer of coarse-grained soil and relative density was evaluated for whole layer combining the results of q_{dyn} measured for G2 / GP and G3 / G-F layers. By applying the correlation according to Švasta [15] (Tab. 3), the relative density of Danube gravels was evaluated as medium dense. According to the correlation published in the Slovak standard STN 72 1032 [14] (Tab.4), gravelly soil is characterized either as loose or medium dense. Using correlation according to Obert [15] (Tab. 4), the soil was generally characterized as medium dense. In a view of the correlation according to the group of authors Ohde, Schubert and Haefeli [9] (Tab. 4), the soil is medium dense to dense. The most critical assessment is according to STN 72 1032 [14]. This is due to the fact, that this Slovak standard, among all applied correlations, determines the highest limit value of q_{dyn} between the stages of relative density.

Certain differences can be observed in the evaluation of the relative density of a selected type of coarse-grained soil. The graphs (Fig. 3) indicate that chosen correlations may have a greater influence on the evaluation of the relative density than the type of applied dynamic penetration.

5 CONCLUSION

The dynamic penetration test is a field test, that is used to derive selected geotechnical parameters of coarse-grained soils (I_D , E_{def} , ϕ_{ef} , ρ_d). The most frequent correlation is between the results of DP test and the relative density of coarse-grained soils. Available correlations (Tab.3, Tab. 4) are in most cases derived primarily for heavy dynamic penetration. There are very few correlations available for medium and light DP test, since in a period of significant development of DP, the DPH test was the most widely used penetration test. At present, in addition to DPH test, DPL and DPM are also beginning used, especially in the environment of loose to medium dense coarse-grained soils. Therefore, it is necessary to assess the applicability of published correlations also for other types of dynamic penetration.

In this article, the relative density of selected layers of the Danube gravels was analyzed from the results of DPM and DPH. Since results of DPH and DPM tests are comparable, the correlations for DPH can be applied to results of DPM as well. The evaluation of specific dynamic penetration resistance q_{dyn} and the assessment of relative density for selected soil layers are summarized in the Tab. 2 and graphs in Fig. 2, Fig. 3. The relative density of poorly graded gavel and gravels with mixture of fine particles was determined by some selected correlations suitable for gravels (Fig. 3). The relative density graph points out some differences in relative density assessment, that are most likely caused by applied correlations. Moreover, these differences may occur because just some correlations reflect the type and soil genesis. At present, the standards provide mostly general recommended correlations for evaluation of geotechnical parameters from the results of the dynamic penetration test. Existing correlations need to be re-evaluated and soil genesis taken into consideration.

Acknowledgement

This paper was supported by Grant Agency of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic, VEGA, grant project No. 1/0842/18.

References

- [1] Schnaid, F.: In Situ Testing in Geomechanics, The main tests. London, New York: Taylor & Francis.

2009. 328 p. ISBN 0-203-93133-5
- [2] KOPECKÝ, Miloslav - ONDRÁŠIK, Martin - BRČEK, Martin - JANTÁK, Viktor. Risk Analysis of the Motorway Routes in Landslides Area. In World Multidisciplinary Civil Engineering, Architecture, Urban Planning Symposium (WMCAUS 2018) : proceedings. 18–22 June 2018, Prague, Czech Republic. 1. vyd. Bristol : IOP Publishing, 2019, [10] s., art. no. 042009. ISSN 1757-8981.
- [3] KOPECKÝ, Miloslav - ONDRÁŠIK, Martin - FRANKOVSKÁ, Jana - BRČEK, Martin - JANTÁK, Viktor. Zhodnotenie rizík výstavby trasy D1 v zosuvnom území. In Geotechnika 2018 [elektronický zdroj] : sborník příspěvků 16. mezinárodní konference. Soláň, ČR, 18. - 19. 10. 2018 = Geotechnics 2018, the conference proceedings of the 16th International Conference. 1. vyd. Ostrava : Fakulta stavební VŠB - Technická univerzita v Ostravě, 2018, CD-ROM, [10] s. ISBN 978-80-248-4216-5.
- [4] Frankovska, Jana, Collapsibility of loess evaluated from field and laboratory tests. 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2016: Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, Vol I, Page 731-737
- [5] Frankovska J., Ondrasik M., Kallberg C.: Deep geothermal energy wells based on artificial large area fractures. (2016) Energy Geotechnics - Proceedings of the 1st International Conference on Energy Geotechnics, ICEGT 2016, pp. 53-56.
- [6] EN ISO 22476-2: Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 2: Dynamic Probing
- [7] Herrik, J. E – Jones, T. L. A., Dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. 2002. Soil Science Society of America Journal
- [8] Langton, D., The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction, 1999, Ground Engineering, p. 33– 37
- [9] Vrettos, C., Papamichael, S.: Relative density of cohesionless soils from dynamic probe and cone penetration test – An update assessment of empirical relationship. Geotechnik 41 (2018), p. 186-196
- [10] Minasny, B., Contrasting soil penetration resistance values acquired from dynamic and motor operated penetrometers, 2012, Geoderma vol. 177-178, p. 57-62
- [11] EN 1997-2:2007: Eurocode 7. Geotechnical design. Part 2: Ground investigation and testing.
- [12] DIN 4094-3:2002: Subsoil. Field testing. Part – 3: Dynamic probing.
- [13] PN-B-04552:2002: Geotechnika. Badania polowe.
- [14] STN 72 1032:1997: Dynamická penetračná skúška
- [15] Matys, M., Ťavoda, O., Cuninka, M. “Poľné skúšky zemín”, Alfa, Bratislava, Slovakia, 1990
- [16] Kuvik, M., Bohyník, J., Sinak, M., Stolárik, L., Coplák, M., Copláková, J., Holeša, Borovský, M., Flimmel, J., Huljak, Š., Žabková, E., Grenčíková, A., (2015): Diaľnica D4 Bratislava, Jarovce – Ivanka sever, podrobný inžinierskogeologický prieskum, CAD-ECO a.s. Bratislava
- [17] STN 72 1001:2010: Klasifikácia zemín a skalných hornín.

MIKROVYZTUŽOVÁNÍ ZEMIN VLÁKNY ZHOTOVENÝMI POMOCÍ 3D TISKU

FIBRE-REINFORCED SOIL BY 3D PRINTED FIBRE

Pavel Koudela^{*1}, Juraj Chalmovský¹, Lumír Miča¹

^{*}koudela.p@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky, Veveří 331/95, Brno 602 00, Česká republika

Abstrakt

Mikrovyztužování zemin vláknou je metodou pro zlepšení vlastností zemin. V této oblasti byla provedena již řada výzkumů, avšak všechny se zaměřovaly na použití vláken, jejichž tvar byl rovný a povrch hladký. To může způsobovat nedostatečnou interakci mezi zeminou a výztužnými vlákny. Větší interakce mezi vlákny a výztuží může být dosaženo úpravou tvaru a povrchu a tím může být dosaženo i vyšší pevnosti kompozitu. V této práci je představeno mikrovyztužování zeminy rozptýlenými vlákny, které byly vyrobeny za použití 3D tisku. Tato technologie umožnila vytvořit různé tvary vláken a následně testovat jejich příspěvek ke smykové pevnosti zeminy. Při laboratorních zkouškách bylo zjištěno, že při použití vláken s modifikací tvaru je dosaženo vyšší pevnosti kompozitu než v případě rovných vláken.

Klíčová slova

Vyztužování vláknou, smyková pevnost, 3D tisk, písek, zemina

Abstract

Fibre reinforcing of the soils is one of the methods used for improving the properties of the soils. The many research papers were interested in the fibre reinforcing however, used fibres were straight with smooth surface usually. These properties may not ensure sufficient interaction between soil aggregates and fibres. This disadvantage could be eliminated by modification of shape or surface of each fibre and achieve a higher strength of the soil-fibre composite. In this paper is present the soil reinforcing by fibres manufactured by 3D printer. The fibres with the various shapes were made and tested. In the case of the modified fibres, the higher peak strength of the composite occurred.

Key words

fibre reinforcing, shear strength, fusion deposition modelling, sand, soil

1 ÚVOD

Vyztužování zemin pro dosažení vyšších pevnostních parametrů anebo zvýšení jejich mechanické odolnosti je využíváno řadu let. Mimo dnes běžně používané zemní konstrukce, kde jsou využívána geosyntetika (geomříže, geobuňky), je možné zvýšit mechanickou odolnost zemin i tzv. rozptýlenou výztuží, známou spíše z betonových konstrukcí. Jako rozptýlená výztuž do betonových konstrukcí jsou používána vlákna z plastických hmot (polypropylen, polyetylen) a vlákna ocelová. Pro mikrovyztužování zemin je možné použít stejné typy vláken. Pro vlákna z plastických hmot je společným ukazatelem přímý tvar a hladký povrch. To způsobuje nižší interakci mezi vlákny a zeminou a tím dosažení nižší výsledné pevnosti kompozitu než v případě vláken s hrubým povrchem či modifikací tvaru. Taková úprava vláken zajistí významnější přenos vnějšího zatížení do výztužných vláken.

Hlavním cílem této práce je ověřit, zda komplexnější tvary rozptýlené výztuže mohou přispět ke zvýšení odolnosti kompozitu zemina-vlákna vůči vnějšímu zatížení, více než použití hladkých vláken. Vlákna používaná v této práci jsou vyrobena aditivní technologií 3D tisku. Pro ověření předpokládané hypotézy bylo použito několik typů vláken s různým tvarem či zakončením. Sledovaným parametrem byla dosažená maximální pevnost kompozitu zemina-vlákna zjišťovaná v triaxiálním přístroji konsolidovanou odvodněnou zkouškou. Použitou zeminou byl mírně jílovitý hrubozrný písek CSa, zatížený dle ČSN EN ISO 14688-1 [1].

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Vyztužování materiálů vlákny je obecně známo po staletí. Prvním takto používaným materiálem byly nepálené cihly, vyztužené především rostlinnými zbytky obilovin. Dnes je vyztužování vláknou spojeno především s betony vyztužovanými ocelovými nebo plastickými vlákny, pro dosažení větší pevnosti a houževnatosti. Vyztužování zemin vláknou se věnovala celá řada autorů. Zejména však šlo o vlákna jejichž tvar byl přímý a povrch hladký. Také se většina prací zabývala vyztužováním nesoudržných zemin, písků, a to o různé frakci.

Vlivu vyztužení písků různými vlákny, a to z plastických hmot, přírodním a ocelovým se věnovali např. Gray a Ohashi [2]. Laboratorní zkoušky prováděli v krabicovém smykovém přístroji. Dále také jejich studie obsahuje vývoj modelu a metody pro určení zvýšené pevnosti písků vlivem vyztužení.

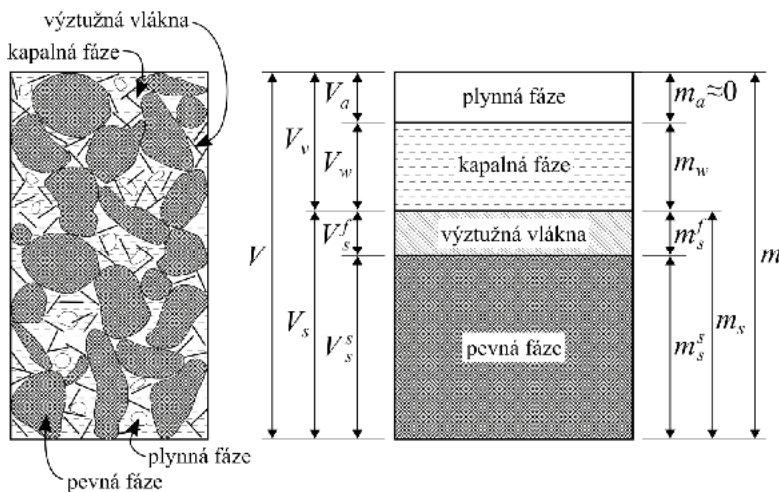
Podobnou cestou se ubírali ve své práci Michalowski a Čermák [3]. Jejich odvozené zkoušky vyztužených zemin v triaxiálním přístroji na pískách vedly k zjištění, že je možné dosáhnout až 70% zvýšení vrcholové pevnosti písků. Ve své práci využívali několika typů vláken a jejich různého poměru v připraveném kompozitu. Závěrem jejich práce bylo, s využitím poznatků z laboratorních zkoušek, vytvoření materiálového modelu pro vyztuženou zeminu.

Řadu vláken, a to z rýžových a pšeničných klasů či jutová a polypropylenová vlákna využil ve svém výzkumu Wei et al. [4]. Zkoušky jednoosé stlačitelnosti zemin s polypropylenovými vlákny ukázaly na 125% zvýšení pevnosti oproti zemině nevyztužené vlákny. Další vzorky kromě vyztužení vláknou zlepšoval i vápnem. Pojiva přidaná do vláknou vyztužených zemin nejsou neobvyklá [5] a [6].

Noorzad a Zarinkolaei [7] použili ve své práci písek vyztužovaný polypropylenovými vlákny. Laboratorní zkoušky prováděli v krabicovém smykovém přístroji a triaxiálním přístroji. Nejvyšších poměrů zlepšení zemin vláknou dosáhli u vláken 18 mm dlouhých při komorových tlacích 50 kPa. Faktor zlepšení byl na úrovni hodnoty 6.7, tedy 670 %. Při zkouškách však bylo zjištěno, že faktor zlepšení se snižuje se zvyšujícím se komorovým napětím.

Popis kompozitu zemina-výztuž

Standardní tří-fázový diagram zemin se skládá z pevné fáze, kapalné a plynné. V případě vyztužené zemin jsou součástí pevné fáze, obvykle složené pouze ze zrn zemin, i výztužná vlákna. Ilustrace tří-fázového diagramu vyztužené zemin je uvedena na Obr. 1.



Obr. 1 Tří-fázový diagram vyztužené zemin dle [8].

Pro další laboratorní činnosti bylo nutné stanovit základní parametry kompozitu. V první řadě číslo pórovitosti e (1) [8]. I přes doplnění pevné fáze výztužnými vlákny, definice čísla pórovitosti zůstala nezměněna.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V_s^s + V_s^f} \quad (1)$$

kde V_v je objem pórů, V_s objem pevné fáze, V_s^s objem pevných částic zemin, V_s^f objem výztužných vláken.

Dále bylo nutné definovat poměr výztužných vláken v kompozitu $p_{v,f}^*$ (2). Ten byl definován objemově, jako objem vláken ku objemu pevných částic zeminy.

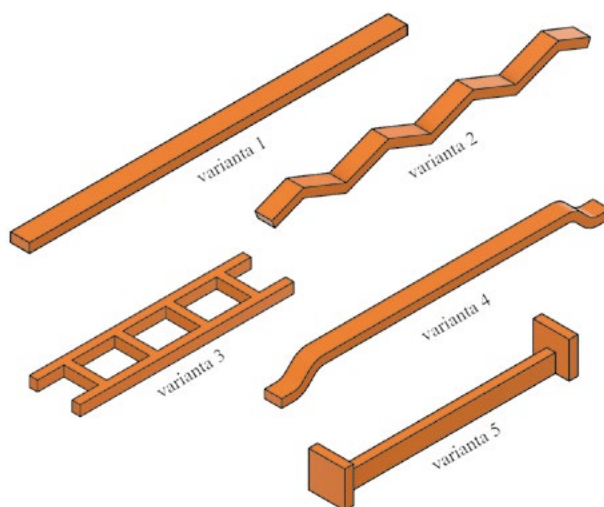
$$p_{v,f}^* = \frac{V_s^f}{V_s^s} \quad (2)$$

3 METODIKA

Výztužná vlákna

V této studii bylo použito 5 typů vláken. Jelikož se vlákna s jiným než přímým tvarem nebo hladkým povrchem nevyskytují na trhu, byla součástí této studie i výroba vláken. K výrobě vláken byla použita běžně dostupná komerční 3D tiskárna. Z řady technologií aditivní výroby byla v této práci využita technologie nazývaná fused deposition modelling (FDM) [9]. Připravený 3D model objektu je rozdělen po výšce na vrstvy. Po těchto vrstvách je roztavená plastická hmota kladena postupně na sebe do doby dokončení objektu.

Tvary navržených vláken byly inspirovány rozptýlenou ocelovou výztuží do betonu a také vlastní invencí autorů studie a jsou uvedeny na Obr. 2. Základním vláknem vytvořeným i pro porovnání účinků vyztužení bylo vlákno přímé, v této studii nazýváno jako varianta 1. Druhé vlákno, varianta 2, je vlákno s analogickým tvarem jako vlákna používaná do betonu s vlnkovitým tvarem. Vlákno varianty 3 připomíná tvarem žebříček a bylo vytvořeno autory studie. Varianta 4, vlákno s konci zakončenými háčkem jsou opět vlákna podobná vláknům používaným v betonu. V průběhu testů bylo vytvořeno i páte vlákno, varianta 5, které svým tvarem vytváří interakci se zrnny pouze koncovými prvky, tzv. kotvičkami. Při návrhu velikosti vláken bylo použito doporučení velikosti vlákna z provedených testů dle Wei et al. [4], které má být kratší než polovina průměru vzorku v rozmezí 30 % - 40 % průměru vzorku. Dalším omezením velikosti vlákna, avšak v minimálních rozměrech, byly technické schopnosti 3D tisku technologií FDM. Tím byly stanoveny rozměry přímého vlákna a jeho objem. Rozměr přímého vlákna byl 0,48 mm tloušťka, 1 mm šířka a 20 mm délka. Pro zachování stejného počtu vláken v připraveném vzorku a tím pádem stejného množství vláken na vzniklé ploše porušení, byla další vlákna vytvořena se stejným objemem jako přímá vlákna (9,60 mm³) a to zkrácováním jejich délky. Důležitým krokem byla i volba materiálu pro výrobu vláken. Tiskárny založené na principu FDM používají různé plastické hmoty. Jako materiál pro výrobu vláken bylo zvoleno PET-G. Tento známý a odolný polyester doplněný o přídavek glykolu z důvodu lepších tiskových vlastností a zvýšení houževnatosti, je běžně používaný materiál pro aditivní metodu výroby objektů a vyznačuje se dobrým chováním při vrstvení taveného materiálu.



Obr. 2 Vizualizace výztužných vláken.

Testovací plán

Hlavní částí této studie jsou laboratorní zkoušky pro ověření vyšší interakce modifikovaných vláken a zeminy a tím vyšší dosažené pevnosti. Dle zmíněné literatury, bylo k testování použito písku o různé zrnitosti a také různých typů laboratorních zkušek. Z krabicových smykových zkušek, prostých tlakových a triaxiálních, byla zvolena pro tuto studii poslední jmenovaná, triaxiální zkouška typu CD, tedy konsolidovaná odvodněná triaxiální zkouška. Jedná se o standardně prováděnou zkoušku pro zjištění pevnostních parametrů zemín. Skládá se ze sycení pórů vzorku vodou, následně je vzorek konsolidován s možností odtoku vody ze vzorku a závěrečnou fází je smýkání, které probíhá odvodněně, pórový tlak je tedy konstantní po celou dobu smýkání.

Vzorky použité pro testování měly válcový tvar a rozměry 50 mm v průměru a 100 mm na výšku. Připravená směs písku obsahovala 4 % výztužných vláken v objemovém poměru dle (2). Míra hutnění byla dána číslem pórovitosti odpovídajícímu maximální objemové hmotnosti sušiny $\gamma_{d,max}$ získaným z Proctorovy zkoušky na nevyztuženém písku. Příprava vzorku probíhala hutněním s pomocí ručního pěchu po vrstvách. Výška jednotlivých vrstev byla měřena s cílem dosáhnout stejných počátečních podmínek pro všechny testované vzorky. Každá vrstva kompozitu byla připravována separátně, pro zajištění homogenního rozložení výztužných vláken ve vzorku. Hutněn na stejné číslo pórovitosti byl i vzorek nevyztuženého písku.

První částí laboratorní zkoušky bylo provedení tzv. perkolace. Tato procedura slouží pro naplnění většiny pórů zeminy vodou. Perkolace byla provedena odvodušenou vodou, která byla do vzorku pomalou rychlostí přivedena jeho spodní podstavou. Vzorek byl tímto způsobem sycen přes spodní podstavu vzorku s odtékáním vody horní podstavou vzorku. Ukončení perkolace nastalo po konstantním odtoku vody ze vzorku a nárůstu tlaku pórové vody po uzavření odtokového ventilu. Zvýšení tlaku poukazuje na vyplnění pórů vodou, které touto metodou mohou být vyplněny. Následovalo standardní sycení, do celkového tlaku 600 kPa, kde plné nasycení bylo kontrolováno procedurou B-test. Vzorek byl po plném nasycení zkonsolidován na hodnotu středního efektivního napětí 150 kPa. Stanovení rychlosti smýkání bylo provedeno dle ČSN EN ISO 17892-9 [10] z rychlosti konsolidace vzorku a následně zvoleno jako 0,025 mm/min. Testování vzorků probíhalo s automatickým záznamem všech veličin důležitých pro následné vyhodnocení zkušek.

Vyhodnocení

Z laboratorních zkušek na vyztuženém i nevyztuženém písku, bylo provedeno standardní vyhodnocení triaxiálních zkušek. Ze záznamu osového a objemového převážení vzorku a na základě sledovaného přetváření vzorku byl vybrán vztah pro změnu plochy vzorku (3), která je důležitá pro správné vyhodnocení napětí ve vzorku, jelikož plocha není v průběhu smýkání konstantní.

$$A = A_0 \frac{1 - \varepsilon_v}{1 - \varepsilon_a} \left(2 - \sqrt{\frac{1 - \varepsilon_a}{1 - \varepsilon_v}} \right) \quad (3)$$

kde A je aktuální plocha vzorku, A_0 je původní plocha vzorku, ε_a je osově přetvoření a ε_v je objemové přetvoření.

Kritéria pro kvantifikaci vlivu vláken na zlepšení vlastností půdy jsou uvedena ve vztazích (4) a (5) [8]. Vyhodnocení míry zlepšení vyztužením je dáno vztahem (4). Tento parametr bude využíván jako hlavní hodnotící kritérium pro určení míry zlepšení vyztužené zeminy oproti zemině nevyztužené. Faktor zlepšení I_{df} je definován jako nárůst deviátoru napětí u vyztužené zeminy k deviátoru napětí u nevyztužené zeminy.

$$I_{df} = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{pU}} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{pR} - (\sigma_1 - \sigma_3)_{pU}}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{pU}} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{pR}}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{pU}} - 1 \quad (4)$$

kde $(\sigma_1 - \sigma_3)_{pR}$ je maximální deviátorové napětí dosažené u vyztužené zeminy, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{pU}$ je maximální dosažené deviátorové napětí u nevyztužené zeminy.

Dalším sledovaným parametrem je index I_b (5). Index vyjadřuje velikost povrchového poklesu deviátorového napětí.

$$I_b = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_p - (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_p}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} - 1 \quad (5)$$

kde $(\sigma_1 - \sigma_3)_p$ je maximální dosažený deviátor napětí, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ je finální deviátorové napětí zkoušky.

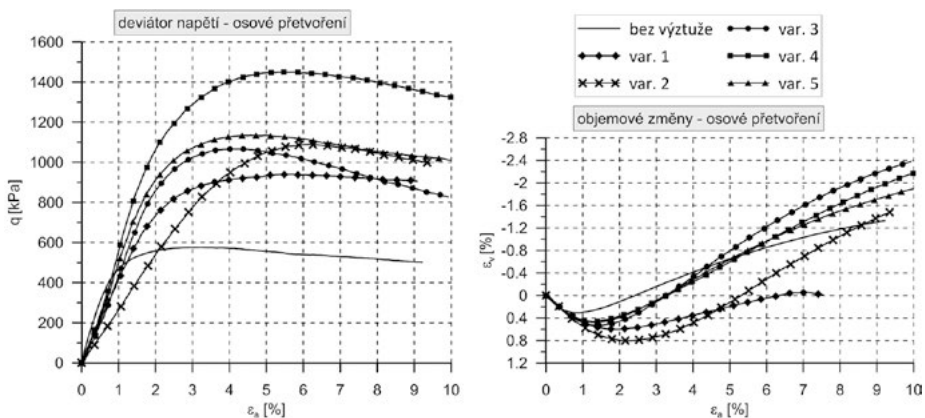
4 VÝSLEDKY

Výsledky laboratorní zkoušek jsou uvedeny v Tab. 1 a na Obr. 3. V Tab. 1 jsou uvedeny hodnoty získané z triaxiálních zkoušek. Maximální deviatorové napětí $(\sigma_1 - \sigma_3)_p$, deviatorové napětí při osovém přetvoření 9 % $(\sigma_1 - \sigma_3)_{9\%}$, faktor zlepšení a index vyjadřující po vrcholový pokles deviatoru napětí. Deviatorové napětí pro osové přetvoření 9 %, bylo zvoleno jako finální, z důvodu protřžení membrány u jedné ze zkoušek.

Tab. 1 Přehled výsledných hodnot z triaxiálních zkoušek vyztužené zeminy

ID	varianta vlákna	$p^*_{v,r}$ [%]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_p$ [kPa]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{9\%}$ [kPa]	I_{dr} [-]	I_b [-]
Tr-I	-	0	572,6	496,3	-	0,15
Tr-II	varianta 1	4	932,2	893,4	0,63	0,04
Tr-III	varianta 2	4	1075,6	1052,1	0,88	0,02
Tr-IV	varianta 3	4	1067,4	869,5	0,86	0,23
Tr-V	varianta 4	4	1450,7	1360,8	1,53	0,07
Tr-VI	varianta 5	4	1135,2	1033,1	0,98	0,10

Na Obr. 3 jsou zobrazeny průběhy veličin měřených nebo vyhodnocených z triaxiálních zkoušek. V první části je závislost deviatorového napětí na osovém přetvoření. V druhé části jsou zobrazeny objemové změny vs. osové přetvoření.



Obr. 3 Graf průběhu deviatoru napětí k osovému přetvoření a objemových změn k osovému přetvoření.

5 DISKUZE

Z prezentovaných výsledků v předchozí kapitole je zřejmé, že vyztužení zeminy vlákny mělo ve všech případech výrazný vliv na zvýšení maximálního dosaženého deviatoru napětí. V případě přímé výztuže došlo ke zvýšení deviatoru napětí o 63 %. Další modifikace tvaru vedla k dalšímu zvýšení deviatoru napětí. Nejvyšší deviator napětí byl dosažen u výztužného vlákna s háčkem na koncích s faktorem zlepšení 153 %. Další výztuže nevykazovali tak výrazné zlepšení v dosaženém deviatoru ve srovnání s přímou výztuží.

V diagramu průběhu objemových změn můžeme vidět, že v případě vyztužené zeminy docházelo v první fázi smýkání k vyšší kontraktanci materiálu než v případě nevyztužené zeminy. Největší komprese vzorku v počáteční fázi smýkání nastala u vzorku vyztuženého profilovanými vlákny. Tento jev zřejmě nastal díky obtížnému hutnění písku při přípravě vzorku, kdy různá profilování výztužných vláken nedovolila dosáhnout požadovaného stupně zhutnění v okolí vláken. Po počátečním stlačování vzorku nastala dilatance, která je opět nejvýraznější u profilované výztuže. Při smýkání pravděpodobně byla zrna písku nadzvedávána právě pilovým tvarem výztuže. Významné negativní objemové změny však nastaly i v případě ostatních komplexních tvarů výztuže. Podobné

chování bylo pozorováno i na kontaktech horninových bloků, kde je rozhodující profil jejich povrchu [10]. Vyšší drsnost povrchu má za následek vyšší úhel dilatace a vyšší smykovou pevnost.

Dalším jevem, který se pojí s výše uvedeným pozorováním, je snížení počáteční tuhosti vzorků vyztužených zemín. To může být způsobeno opět sníženým stupněm zhutnění materiálu v okolí výztužných vláken. Druhým důsledkem pozorovaným i v [2], kde byla použita polyamidová vlákna, je tuhost materiálu výztuže. U vláken ocelových stejný jev nenastával. Tuhost výztužných vláken tak zřejmě ovlivňuje celkovou tuhost vyztužené zeminy.

6 ZÁVĚR

Prezentované výsledky laboratorních zkoušek na kompozitu písku s výztužnými vlákny prokázaly, že použití vláken s komplexnějším tvarem nebo zakončením vedou k vyšším dosaženým pevnostem než v případě použití přímého vlákna. To potvrzuje vyšší interakci mezi vlákny a zrny zeminy. Dosaženo bylo však nižších počátečních tuhostí testovaného kompozitu oproti nevyztužené zemině. Z dosavadních výsledků zkoušek bylo zjištěno, že vyšších pevností dosáhly kompozity s výztužnými vlákny s různým zakončením oproti kompozitům s vlákny která mají komplexnější tvar.

Výzkum v této oblasti se bude dále zaměřovat na použití písku s jemnější zrnitostí, kde menší zrna písku se mohou lépe zaklínit do komplexních struktur výztužných vláken. Mimo to je v dostupné literatuře uvedeno, že poměr velikosti vláken a zrn zeminy má vliv na výslednou pevnost. V dalších krocích výzkumu bude provedeno porovnání vlivu objemového podílu a velikosti výztužných vláken na výslednou pevnost kompozitu.

Poděkování

Tento výzkum je podporován Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu FAST-S-19-5724 Zkoumání vlivu geometrie vlákna zhotoveného technologií 3D tisku na mechanické chování zeminy zlepšené rozptýlenou výztuží.

Použité zdroje

- [1] ČSN EN ISO 14688-1: Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zařídování zemín - Část 1: Pojmenování a popis. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [2] GRAY, Donald H. a Harukazu OHASHI. Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand. *Journal of Geotechnical Engineering* [online]. 1983, 109(3), 335-353. ISSN 0733-9410.
- [3] MICHALOWSKI, Radoslaw L. a Jan ČERMÁK. Triaxial Compression of Sand Reinforced with Fibers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* [online]. 2003, 129(2), 125-136. ISSN 1090-0241.
- [4] WEI, Li, Shou Xi CHAI, Hu Yuan ZHANG a Qian SHI. Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, 172, 300-308. ISSN 09500618.
- [5] OLGUN, M. Effects of polypropylene fiber inclusion on the strength and volume change characteristics of cement-fly ash stabilized clay soil. *Geosynthetics International* [online]. 2013, 20(4), 263-275. ISSN 1072-6349.
- [6] CHEN, Mu, Shui-Long SHEN, Arul ARULRAJAH, Huai-Na WU, Dong-Wei HOU a Ye-Shuang XU. Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized Shanghai soft clay. *Geotextiles and Geomembranes* [online]. 2015, 43(6), 515-523. ISSN 02661144.
- [7] R. Noorzad and S. T. G. Zarinkolaie, "Comparison of Mechanical Properties of Fibre-Reinforced Sand under Triaxial Compression and Direct Shear", *Open Geosciences*, vol. 7, no. 1, pp. 547-558, Jan. 2015.
- [8] SHUKLA, Sanjay Kumar. *Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2017. Developments in Geotechnical Engineering. ISBN 978-981-10-3061-1.
- [9] STRÍTESKÝ, Ondřej, Martin BACH a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha: Prusa Research, 2019. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
- [10] ČSN EN ISO 17892-9: Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemín - Část 9: Konsolidovaná triaxiální zkouška v tlaku vodou nasycených zemín. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [11] BARTON, N. The shear strength of rock and rock joints [online]. 1976, 13(9), 255-279. ISSN 01489062.

VLIV VLHKOSTI DŘEVA NA HLOUBKU VRTU PŘI ZKOUŠENÍ KUČEROVOU VRTAČKOU

INFLUENCE OF WOOD HUMIDITY ON THE DRILL DEPTH DURING THE TESTING BY A KUČERA DRILL

Pavel Černý^{*1}, Romana Halamová¹

^{*}166889@vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Dřevěný materiál v konstrukcích se v praxi potýká s různými druhy poškození, které ovlivňují jeho mechanické a fyzikální vlastnosti. Tyto vlastnosti mají velký vliv na diagnostiku daných konstrukcí, tudíž musí být přihlíženo k formám testovacích metod, které jsou na konstrukci prováděny. Z diagnostického hlediska jsou využívány nedestruktivní (zcela neinvazivní metody), semi-destruktivní (částečně invazivní metody) a destruktivní (zcela invazivní metody). K nalezení hodnot pro diagnostické ověření byla použita speciální elektrická vrtačka – Kučerova vrtačka, která byla upravena.

Klíčová slova

Kučerova vrtačka, diagnostika dřeva, hloubky vrtů do dřeva

Abstract

In practice, wood material in structures suffers from various types of damage that affect its mechanical and physical properties. These properties have a great influence on the diagnostics of the structures, therefore the forms of test methods that are performed on the structure must be taken into account. From a diagnostic point of view, non-destructive (completely non-invasive methods), semi-destructive (partially invasive methods) and destructive (fully invasive methods) are used. A special electric drill was used to find the values for diagnostic verification – the Kučera drill, which was modified for use in wood diagnostics.

Key words

Kučera drill, wood diagnostic, depth of holes in wood

1 ÚVOD

Dřevo je jeden z nejčastěji používaných materiálů historických budov a často může vykazovat mnoho vad a poškození. Jedná se například o praskliny, suky, poškození vlivem hub, plísní nebo hmyzem. Jeho diagnostika nejčastěji spočívá ve vizuálním posouzení jeho stavu [1]. V případě nutnosti podrobnějšího posouzení je snaha o co nejmenší a nejšetrnější zásah do konstrukce a nahrazení destruktivních metod metodami nedestruktivními nebo semi-destruktivními. Proto se tyto metody v posledních letech dostávají do popředí.

Posouzení kvality dřeva v konstrukci je poměrně složitý problém, vzhledem k vysoké variabilitě jeho vlastností (jako např. hustota, mechanická pevnost, modul pružnosti, barva atd.) a také vzhledem k neznámému počátečnímu stavu. Určité vlastnosti dřeva se navíc v průběhu času mění a způsobují postupné změny [2].

Dřevo jakožto hygroskopický materiál je velmi ovlivněno vlhkostí, kterou z okolí přijímá nebo naopak okolí odevzdává. Vlhkost se samovolně mění na základě přímého kontaktu s vlhkostí okolního prostředí [3]. V diagnostice dřevěných konstrukcí je mnoho využívaných metod, ale dá se říct, že těch méně destruktivních není zatím tolik. Čím méně je dřevo v konstrukci při diagnostickém ověření poškozeno při získání potřebných hodnot a údajů, tím lepší je to pro danou dřevěnou konstrukci z hlediska životnosti. Zejména pak u historických staveb a staveb kulturního dědictví je vhodné používat co nejšetrnější metody pro diagnostikování jejich konstrukcí [4]. V současnosti se dají využít například metody úplně nedestruktivní, jako je například ultrazvuková metoda, dále pak jsou známy metody semi-destruktivní, jako například odporové zarážení trnu, odporové vrtání aj. Mezi takové metody by mohlo patřit i vrtání Kučerovou vrtačkou, která je primárně určena pro stanovení pevnosti malty. Metoda je založena na předpokladu, že s rozdílnými vlastnostmi dřeva bude i rozdílná hloubka vrtu. Tato metoda

může přinést hojné výsledky. Kučerova vrtačka musela být přetransformována na vrtáky pro použití do dřeva. Cílem práce je navrhnout a ověřit funkčnost této metody pro zkoušení dřevěných konstrukcí. Článek se zabývá vlivem vlhkosti na hloubku vrtu Kučerovi vrtačky.

2 VLASTNOSTI DŘEVA A JEJICH ZJIŠŤOVÁNÍ

Zásadní vliv na vlastnosti dřeva má jednoznačně při běžném využití vlhkost, která má většinou negativní účinky na fyzikální a mechanické vlastnosti. Samotná vlhkost se vyjadřuje poměrem mezi hmotností vody ve dřevě a hmotností vysušeného dřeva. Voda se ve dřevě vyskytuje ve třech podobách:

- chemicky vázaná voda
- volná voda
- hyroskopicky vázaná voda [3].

Je-li ve dřevě obsažena vyšší vlhkost, dochází k výraznému zhoršení jednotlivých vlastností. Dřevo je hyroskopický materiál, což v praxi znamená, že je to materiál schopný přijímat vodu z okolního prostředí a také vodu odevzdávat do okolního prostředí. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva se liší také na základě různých směrů, kde lze rozlišit tyto anatomické směry:

- axiální směr (podél vláken)
- radiální směr (kolmo k vláknům)
- tangenciální směr (kolmo k vláknům)



Obr. 1 Základní řezy dřevem [5].

Výrazný vliv na objemové změny má bobtnání a sesychání, které vychází z vlivu vlhkosti. Při bobtnání dochází ke zvětšování rozměrů, naopak při sesychání dochází ke zmenšení rozměrů. Bobtnání je závislé na směru vláken - podélný, radiální a tangenciální směr. Celkové sesychání se skládá ze součtu sesychání v podélném, tangenciálním a radiálním směru, z čehož následně dochází k rozdělení dřeva na tři druhy. Hustota dřeva se zvyšuje lineárně se stoupající vlhkostí. Je rozlišována hustota suchého dřeva, vlhkého dřeva a hustota dřeva při 12% vlhkosti. Samotné dřeviny jsou na základě hustoty rozděleny na dřeva s nízkou, střední a vysokou hustotou [6].

Nejdůležitější vlastností dřeva je nejčastěji pevnost a také modul pružnosti, kdy dochází se stoupající vlhkostí ke snižování hodnot těchto vlastností. Při vyšší vlhkosti dřeva dochází k napadení dřevokaznými houbami a hmyzem, což také nepříznivě ovlivňuje vlastnosti dřeva. Naopak je-li dřevo trvale ponořené pod vodou a má tím pádem vyšší vlhkost, nedochází ke hnilobě dřeva a zvyšuje se jeho trvanlivost.

3 METODIKA

Metoda je v České republice využívána pro diagnostiku zděných konstrukcí a to konkrétně pro stanovení pevnosti malty. Měření je prováděno pomocí speciálně upravené vrtačky, která byla sestavena na TZÚS v Praze. Vrtačka byla sestavena ve dvou podobách – prvotní verzi byla ruční vrtačka, ze které byla vyvinuta druhotná verze – elektrická vrtačka. Ruční vrtačka je vybavena počítadlem otáček a tlačnou pružinou v opěrce, která má předepsanou tuhost. Tím je zajištěn potřebný přítlak. Metoda spočívá na základě kalibračního vztahu mezi pevností malt a hloubkou vrtu při příklepovém vrtání [7].

Elektrická vrtačka je speciální především stylem svých vrtáků, které jsou do konstrukce vrtačky dotaženy maticí. Dalším zajímavým faktem vrtačky je stupnice, na které lze nastavit příslušný počet otáček zkušebního vrtáku. Po dokončení nastaveného počtu ptáček se vrtačka automaticky vypne. Kalibrační vztah je oproti ruční vrtačce rozdílný. Obě vrtačky jsou zobrazeny na Obr. 2.



Obr. 2 Elektrická Kučerova vrtačka (vlevo), ruční Kučerova vrtačka (vpravo).

Pro použití pro diagnostiku dřeva bylo nutné elektrickou vrtačku upravit, aby bylo možné upevnit vrták pro použití do dřeva. Kučerova vrtačka má svůj vlastní systém upevnění vrtáků, proto bylo nutné nechat vyrobit speciální sklíčidlo, do kterého bude možné upevnit běžný vrták. Cílem experimentu bylo zjistit vliv vlhkosti dřeva na hloubku vrtu Kučerovy vrtačky. Jednalo se o počáteční měření, na které by v další části výzkumu mělo navazovat porovnání s pevnostmi použitého dřeva při určité vlhkosti. Z naměřených dat by měl být vytvořen kalibrační vztah závislosti pevnosti dřeva na hloubce vrtu při určité vlhkosti. Nejprve je ale nutné ověřit, použitelnost Kučerovy vrtačky při různých vlhkostech dřeva.

Pro účel experimentu bylo vybráno smrkové dřevo bez zjevných vad a kazů. Měření probíhalo na zkušebních tělesech o velikosti $50 \times 50 \times 750$ mm. Jedno z těles mělo přirozenou vlhkost danou okolním prostředím. Druhé bylo uloženo do vody, kde bylo nějakou dobu ponecháno. Po vyjmutí mělo o 7% vyšší vlhkost než první těleso. Do těchto těles bylo provedeno vždy 10 vrtů různými druhy vrtáků, neboť je důležité pro budoucí použití vybrat ten nejvhodnější. Použity byly spirálové vrtáky o průměru 4 mm, 5 mm, 6 mm a 7 mm a ploché o průměru 8 mm a 10 mm. Vrtačka byla nastavena na stupeň 1, neboli 25 otáček. Při vyšším počtu otáček totiž v některých případech docházelo k provrtání celého vzorku dřeva, proto byl stupeň 1 zvolen jako nejvhodnější. Vrtání je zobrazeno na Obr. 3.



Obr. 3 Vrtý provedené elektrickou Kučerovou vrtačkou.

4 VÝSLEDKY

Po provedení vrtů do smrkového zkušebního vzorku došlo ke změření samotných hloubek vrtů pomocí posuvného měřítka, které je zobrazeno na Obr. 3.



Obr. 3 Měření hloubky vrtů posuvným měřítkem.

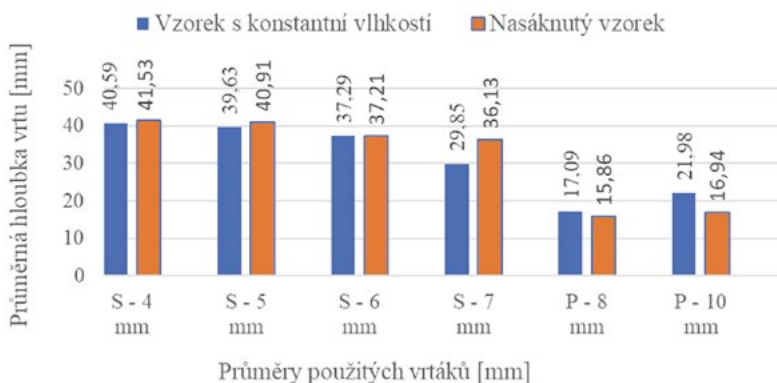
Hloubky provedených vrtů jsou zaznamenány v tabulkách. V tabulce 1 je zaznamenáno měření na tělese uloženém v laboratorním prostředí a v tabulce 2 jsou zaznamenány hodnoty tělesa uloženého před měřením ve vodě. V grafu na Obr. 4 je grafické znázornění výsledků.

Tab. 1 Hloubky vrtů provedených na zkušebním tělese uloženém v laboratorním prostředí.

Typ vrtáku	Hloubky vrtů					Průměr
Spirálový	45,24	42,56	42,63	37,62	46,06	40,59
4 mm	42,29	31,56	38,30	40,44	39,49	
Spirálový	39,45	35,04	44,63	42,00	38,95	39,63
5 mm	38,46	36,75	35,04	43,42	42,59	
Spirálový	30,95	33,24	36,34	35,81	39,12	37,29
6 mm	38,42	35,51	38,61	41,73	43,13	
Spirálový	30,89	36,15	41,35	38,01	32,34	29,85
7 mm	41,86	27,65	29,85	44,32	33,32	
Plochý	11,39	19,06	13,29	13,39	22,31	17,09
8 mm	22,84	13,21	18,61	16,20	20,55	
Plochý	19,71	20,37	22,69	16,45	22,56	21,98
10 mm	24,94	20,72	24,79	24,51	23,10	

Tab. 2 Hloubky vrtů provedených na zkušební tělese uloženém ve vodě.

Typ vrtáku	Hloubky vrtů					Průměr
Spirálový	38,54	39,06	40,72	40,98	41,08	41,53
4 mm	36,77	43,88	41,16	46,90	46,19	
Spirálový	40,77	43,03	39,66	40,29	40,61	40,91
5 mm	41,68	40,65	38,37	40,95	43,10	
Spirálový	27,53	36,18	36,33	27,70	46,55	37,21
6 mm	43,95	38,01	38,15	30,98	46,71	
Spirálový	33,93	33,42	29,36	42,94	35,48	36,13
7 mm	33,84	39,88	37,43	31,06	44,00	
Plochý	16,03	22,39	16,23	15,65	16,13	15,86
8 mm	12,02	16,85	10,73	18,66	13,89	
Plochý	16,69	15,64	12,06	16,81	17,23	16,94
10 mm	21,92	16,04	17,33	17,23	18,41	



Obr. 4 Porovnání průměrné hloubky vrtů u zkušební tělesa uloženém v laboratorních podmínkách a u zkušební tělesa namočeného ve vodě.

5 DISKUZE

Z výsledků jsou patrné drobné rozdíly hloubek vrtů při změně vlhkosti dřeva. Při vrtání spirálovými vrtáky byla ve většině případů hloubka u nasáknutého vzorku nepatrně větší. Dále bylo u spirálových vrtáků zjištěno, že vrtáky s menším průměrem měly menší odpor proti vnikání do dřevěného zkušební vzorku než vrtáky s větším průměrem. Opačný trend v rámci nasáknutého vzorku a vzorku s konstantní vlhkostí byl zjištěn u plochých vrtáků, kde byla hloubka vrtů vyšší v případě vzorku, který byl testován při konstantní vlhkosti vzorku. U plochých vrtáků se také liší odpor proti vnikání a to tak, že vzorek byl odolnější proti plochému vrtáku s menším průměrem. Vrtý byly z důvodu rozměrových hodnot zkušební vzorku provedeny na stupeň 1, který odpovídá 25 otáčkám Kučerovy vrtačky. Všechny hodnoty byly pro přesnost měření měřeny posuvným měřítkem, aby byly zaznamenány všechny hodnoty vrtů, ze kterých vzešel graf na Obr. 6.

6 ZÁVĚR

Závěrem tohoto příspěvku lze konstatovat, že prognózy ohledně odporu proti vnikání u jednotlivých průměrů vrtáku se potvrdily, opakem ovšem byly vrtáky ploché. Na všechny vrtáky bude zaměřena pozornost i v následujících krocích výzkumu, kde tato data budou ověřována a následně prohlubována. Jednoznačným

plánem je testovat různé prostředí vlhkosti, aby tato metoda měla co nejvyšší potenciál při diagnostických testováních v terénu a došlo tak k zanedbatelným poškozením dřevěných konstrukcí. V rámci vývoje projektu bylo nejtěžším krokem transformace Kučerovy vrtačky pro zkoušení na dřevěných konstrukcích, což byl prvotní krok ke konání výzkumu. Cílem dalšího výzkumu bude z hloubky vrtů diagnostikovat pevnost, jako tomu je u zděných konstrukcí. K tomu by měl sloužit kalibrační vztah, který by tuto pevnost na základě zjištěné hloubky vrtu stanovil.

Poděkování

Výsledky uvedené v článku byly získány v rámci řešení projektu .č. FAST-J-20-6308: Návrh a testování nové semi-destruktivní diagnostické metody pro stanovení pevnosti dřeva.

Použité zdroje

- [1] BARTŮŇKOVÁ, Eliška. Non-destructive tests of timber: Nedestruktivní testování dřeva. Brno, 2012. Studentská vědecká a odborná činnost. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Anna Kuklíková, Ph.D., doc. Ing. Petr Kuklík, CSc.
- [2] MIENZ, Peter a David MENNES. Non-destructive testing of wood and wood-based materials. Journal of Cultural Heritage [online]. 2012, 13(3), 26-34 [cit. 2020-11-10]. ISSN 1296-2074. Dostupné z: doi:10.1016/j.culher.2012.04.001
- [3] HEŘMÁNKOVÁ, Věra, Ondřej ANTON a Tereza KOMÁRKOVÁ. Závislost fyzikálních a mechanických vlastností konstrukčního smrkového dřeva na vlhkosti. TZB Ino. Brno, 2018. ISSN 1801-4399.
- [4] KLOIBER, Michal a Miloš DRDÁCKÝ. Šetrné diagnostické metody pro hodnocení bezpečnosti dřevěných konstrukcí. TZB Ino. Telč, 2017. ISSN 1801-4399.
- [5] ANTON, Ondřej. Stavební látky - cvičebnice. 1. Brno: Akademické nakladatelství Cerm, 2013. ISBN 978-80-7204-828-1.
- [6] HORÁČEK, Petr. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. Příprac. vydání. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. ISBN 978-80-7375-169-2.
- [7] HOBST, Leonard, Jiří ADÁMEK, Petr CIKRLE a Pavel SCHMID. Zkoušení cihelného zdiva v konstrukci. Diagnostika stavebních konstrukcí – přednášky. 2005.

POROVNANIE VÝSLEDKOV SKÚŠOK Z CPT A DPT PRE HRUBOZRNNÉ ZEMINY

COMPARISON OF RESULTS FROM CPT AND DPT TESTS FOR COARSE GRAINED SOILS

Ján Mihálik^{*1}, Roman Bulko¹

*jan.mihalik@uniza.sk

Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta, Katedra geotechniky, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Abstrakt

Správne zostavený inžinierskogeologický prieskum je neodmysliteľnou súčasťou každej dôležitejšej stavby. Medzi jeho metódy sa zaraďujú aj statický penetračný test (CPT) a dynamický penetračný test (DPT), ktoré sú využívané najmä pre ich spoľahlivosť získaných výsledkov, ako aj z časového hľadiska pre hodnotenie hrubozrnných zemín. Dostatočná znalosť problematiky a použitie kvalitných penetračných prístrojov v kombinácii s inými prieskumnými metódami sú zárukou dobrých výsledkov v tejto oblasti. Príspevok si kladie za cieľ predstaviť výsledky realizovaných CPT a DPT testov pre hrubozrnné zeminy a vzájomne ich porovnať. Práca je založená na porovnaní výsledkov deformačných modulov zemín, so smernými normovými charakteristikami zemín, ktoré sa používajú na území Slovenskej republiky.

Kľúčové slová

Statická penetračná skúška, dynamická penetračná skúška, penetračný odpor, inžinierskogeologický prieskum

Abstract

Appropriately chosen engineering geology investigation is an integral part of every important construction. Its methods also include the static penetration test (CPT) and the dynamic penetration test (DPT), which are used mainly for the reliability of the results obtained and in terms of time, very suitable for coarse grained soils. Sufficient knowledge of the problem and the use of quality penetration devices in combination with other research methods are a guarantee of good results in this area. The paper aims to present the results of implemented CPT and DPT tests for coarse-grained soils and compare them with each other. The work is based on the comparison of the results of soil deformation modules, with the standard norm characteristics of soils that are used in the Slovak Republic.

Key words

Static penetration test, dynamic penetration test, penetration resistance, engineering geological survey

1 ÚVOD

Kvalitný inžinierskogeologický (IG) prieskum pozostáva z porovnania a interpretácie výsledkov z laboratórnych a in-situ testov. Nedostatkem laboratórneho testovania zemín je zanedbávanie alebo značné zjednodušenie niektorých vplyvov prírodného prostredia, ktoré v laboratórnych podmienkach nie je jednoduché simulovať. Prevláda preto všeobecná snaha o uskutočňovanie IG a geotechnického prieskumu v podobe in-situ (terénnych) testov. Poznatky z prieskumov sa následne uplatňujú v navrhovaní rôznych geotechnických konštrukcií. Penetračné skúšky sú najstaršími a dnes najpožívanejšími metódami, ktorými môžeme zistiť geotechnické parametre zemín. Penetračné sondovanie poskytuje kontinuálne hodnoty parametrov smerom do podlažia, ktoré sú v numerickom modelovaní potrebné na rozšírenie poznatkov o horninovom prostredí, a to hlavne o jeho mechanických a fyzikálnych vlastnostiach [1]. K tomu musíme pridať vývoj a zmeny v testovaní vlastností základového prostredia, kde sa aktuálne kladie čoraz väčší dôraz na sondovanie v mieste stavby, v mieste konštrukcie a preferujú sa rýchle a spoľahlivé metódy určovania geotechnických vlastností.

2 PENETRAČNÉ SKÚŠKY

Statická penetračná skúška (CPT - Cone Penetration Test) je metóda patriaca k in-situ geotechnických skúškam. Princíp statickej penetračnej skúšky spočíva v postupnom zatlačaní sondovacieho sútyčia ukončeného penetračným hrotom do zemi (Obr.1). Zatlačanie hrotu prebieha konštantnou rýchlosťou 20 mm.s^{-1} . Počas zatlačania sa kontinuálnym záznamom získavajú hodnoty odporu na hrote q_c , trenia na plášti f_s , prípadne iné hodnoty v závislosti od druhu použitého hrotu (pórové tlaky, vlhkosť na hrote, ...) [2]. CPT sa uprednostňuje a používa najmä v jemnozrnných ílovitých, siltovitých a piesčitých zeminách. Pre hrubozrnné a štrkovité zemi nemusi byť skúška dostatočne efektívna, pretože o jej ukončení môže rozhodnúť nedostatočná tlačná kapacita prístroja alebo problém ukotviť prístroj v takomto geologickom prostredí [4]. Významným pokrokom v CPT sondovaní je vkladanie snímačov do hrotu. Ide o snímače na meranie relatívneho a lokálneho plášťového trenia, meranie pórových tlakov, meranie kolmosti sondy, rýchlosti penetrácie a teploty zemi [3]. Záznam pórových tlakov sa vykonáva pomocou CPTu hrotu, ktorý bol použitý aj pri skúškach, ktorých výsledky prezentujeme v tomto článku.



Obr. 1 Ukážka zatlačania meracieho hrotu statickej penetračnej skúšky [2].

Dynamická penetračná skúška (DPT – Dynamic Penetration Test) je založená na schopnosti zemin klásť odpor proti dynamickému vnikaniu sútyčia, ktoré je vybavené predpísaným meracím hrotom. V našich podmienkach je to preferovaná metóda a to najmä kvôli svojej spoľahlivosti, jednoduchosti a relatívne nízkej cene. Najvhodnejšie použitie tejto skúšky je v hrubozrnných štrkovitých zeminách a v navážkach. Použitie v jemnozrnných zeminách (napr. neogénnych íloch) značne ovplyvňuje vyber typu prístroja. V prípade nevhodného výberu môže dôjsť k nadhodnoteným alebo nepresným výsledkom. Penetračné zariadenie sa skladá z barana (závažie, ktoré padá z konštantnej výšky), sútyčia so špeciálnym hrotom v tvare kužeľa (priemer hrotu je väčší ako priemer sútyčia), kovadliny a koša. Prístroje rozdeľujeme podľa hmotnosti barana. Je potrebné pripomenúť, že dynamický odpor q_{dyn} z DPT skúšok sa získava pomocou prepočtu z hodnoty N_{10} , ktorá vyjadruje počet úderov potrebných na zaradenie hrotu o 10 cm. Pri vykonávaní skúšky však vzniká nežiadúce plášťové trenie, ktoré je zvlášť výrazné v jemnozrnných zeminách a je nutné zohľadniť ho vo výpočte. Plášťové trenie sa meria momentovým kľúčom po 1 m, [5].

$$N_{10}' = N_{10, namerané} - X \times M_V \quad (1)$$

kde M_V - krútiaci moment [Nm] nameraný pri rotácii sútyčia

X - súčiniteľ závisiaci od typu prístroja: pre prístroj DPH je hodnota $X = 0,4$

$$q_{dyn} = \frac{Q^2 \times H \times N}{A \times e \times (Q + P)} [MPa] \quad (2)$$

kde H - výška pádu barana [m]

P - tiaž penetračnej sondy [kN] (sútyčia, kovadliny, hrotu a koša v príslušnej hĺbke)

Q - tiaž barana [kN]

A - prierezová plocha hrotu [m^2]

N - počet úderov potrebných pre vniknutie hrotu o 10 cm (redukované)

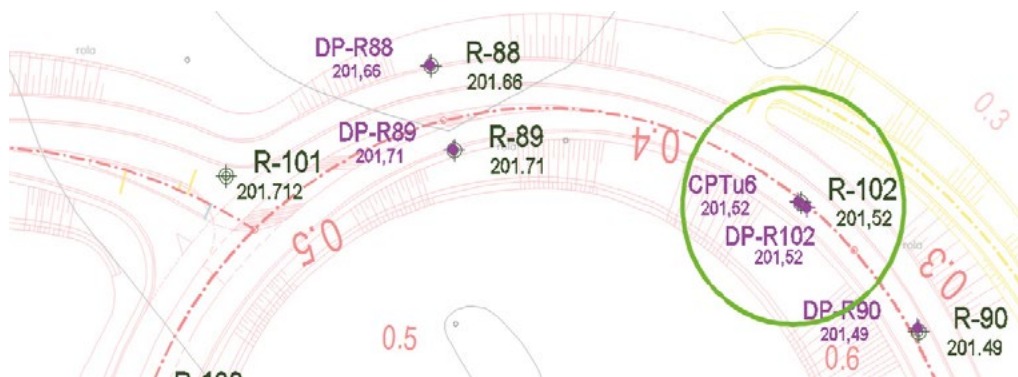
e - vniknutie hrotu o 10 cm [m].

3 INŽINIERSKOGEOLOGICKÝ PRIESKUM LOKALITY

Pre porovnanie a zhodnotenie výsledkov vyššie uvedených skúšok bola vybraná lokalita „Rýchlostná cesta R2 križovatka D1 – Trenčianska Turná“, na ktorej boli realizované skúšky za účelom vykonania podrobného IG prieskumu. V lokalite dlhej zhruba 6,7 km bolo naplánovaných 317 jadrových vrtov (nie všetky boli realizované). Z toho na laboratórne skúšky bolo odoslaných 738 vzoriek zeminy (371 neporušených /jadrá/ a 367 porušených /vrecká, technologické vzorky/), z ktorých sa určovali fyzikálne a mechanické vlastnosti zemín. Z uvedeného súboru laboratórnych skúšok nebolo možné použiť všetky výsledky a porovnať geotechnické laboratórne vlastnosti zemín s výsledkami penetračných skúšok, pretože odbery vzoriek kvôli hĺbke odberu alebo vzdialenosti od vrtu nie vždy korešpondovali s miestom vykonávania penetračnej skúšky.

V záujmovom území bolo vykonaných 25 skúšok CPT s piezoelektrickým hrotom s meraním pórového tlaku (CPTu-4 - CPTu-28) o súhrnnej metráži 188,4 m. Hĺbka jednotlivých sond bola dosahovaná podľa polohy uľahnutých štrkovitých zemín alebo podľa kapacity súpravy. Dynamická penetračná skúška bola vykonaná ťažkou mechanickou sklopnou penetračnou sondou RSG (DPH). Sumárny počet sond dynamickej penetrácie bol 214 kusov s celkovou metrážou 2118,6 m. Z vykonaných skúšok sa na základe penetračných odporov mohli určiť rozhrania vrstiev, typy zemín a pomocou korelačných vzťahov určiť aj geotechnické parametre zemín.

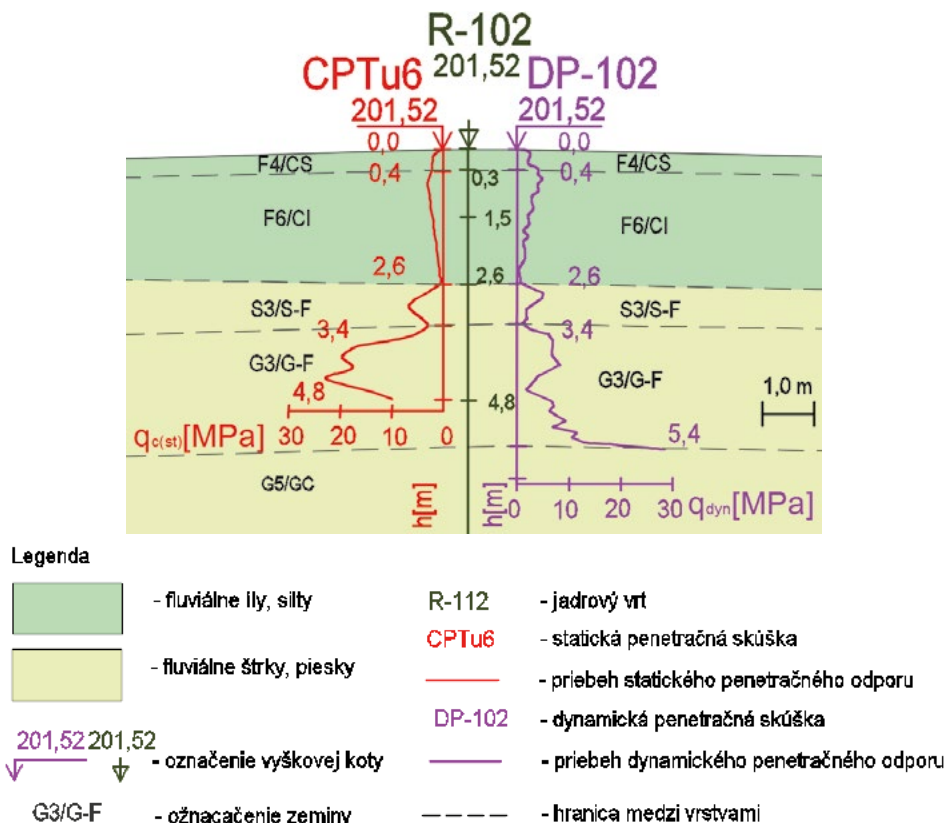
Pri triedení dát a výsledkov z uvedeného počtu penetrácií bolo použitých 9 skúšok CPTu a 9 skúšok DPT, ktoré sa nachádzali v tesnej blízkosti (vytvorenie dvojíc CPTu - statická penetračná skúška a DP- dynamická penetračná skúška, Obr. 2). Cieľom bolo zistiť rozdiely medzi výslednými hodnotami deformačných modulov pre hrubozrné zeminy, porovnať výsledky so smernými normovými charakteristikami a poukázať na prípadné rozdiely medzi výsledkami získanými statickou a dynamickou penetráciou. Aby bolo možné výsledky porovnať so smernými normovými charakteristikami, bolo nutné určiť hodnoty indexu relatívnej uľahnutosti zemín. Vybrané dvojice sond sa nachádzali vo vzájomnej vzdialenosti v rozmedzí od 2,2 m do 10,5 m. Za porovnateľné sme považovali penetračné sondy v čo najmenšej vzájomnej vzdialenosti, čím sme sa snažili eliminovať vplyv prípadnej rozdielnosti mocnosti a vlastnosti vrstiev na výsledky. Tiež sa prihliadalo na zloženie geologických vrstiev, kedy by pri častom striedaní malých mocností vrstiev (napr. ílov, pieskov...) a veľkej vzájomnej vzdialenosti penetračných sond mohlo dôjsť k nesprávnemu vyhodnoteniu v rámci porovnávania zemín. Pri vytvorených dvojiciach bol k dispozícii samozrejme aj jadrový vrt, ktorý sa využíval ako smerodajný podklad k vyhodnocovaniu skúšok. Ku každej dvojici bol zhotovený inžinierskogeologický profil s grafickým vyhodnotením DPT a CPTu sond, ktorý slúžil na lepšie znázornenie prostredia - Obr.3.



Obr. 2 Situácia rozmiestnenia penetračných sond a jadrových vrtov na úseku „Rýchlostná cesta R2 križovatka D1 – Trenčianska Turná“.

Na základe penetračných odporov sme určili rozhrania vrstiev zemín a pomocou korelačných vzťahov sme určili geotechnické parametre zemín I_D , E_{def} . Následne sme hodnotu E_{def} porovnali so smernými normovými charakteristikami. Postup bol taký, že pri hrubozrných zeminách sme určili index uľahnutosti I_D , za smerodajný údaj sa považovala hodnota I_D z DPT a to z dôvodu, že táto metóda je považovaná všeobecne za vhodnejšiu pre hrubozrné zeminy. V závislosti od toho sme mohli určiť rozhranie E_{def} pre danú zeminu podľa tabuliek, ktoré poskytovala STN 73 1001.

Jednou z predností DPT na ktorú je možné poukázať je sondovanie v štrkovitých a piesčitých zeminách. V týchto druhoch zemínach sa nachádzajú často tvrdšie úlomky hornín, ktoré je možné opakovanými nárazmi hrotu preraziť a pokračovať v skúške. Pri CPT v takomto prípade často nastane ukončenie skúšky, ako v prípade CPTu 6, kedy dochádzalo k nadvihnutiu súpravy z dôvodu veľkých penetračných odporov.



Obr. 3 Inžiniersko-geologický rez s priebehmi penetračných odporov q_c a q_{dyn} pre sondy CPTu9 a DP-R110

Určovanie hodnôt statickej penetrácie vychádzalo z nasledujúcich korelačných vzťahov používaných na katedre geotechniky v Žiline [7], [8], [9]:

Index uľahnutosti (CPT)

$$I_D = \frac{28,678 \times \ln(q_c) - 3,5412}{100} \quad (3)$$

kde q_c - odpor na hrote.

Deformačný modul (CPT)

$$E_{def} = -0,0312q_c^3 + 0,7961q_c^2 - 1,3378q_c + 3,52622 \text{ [MPa]} \quad q_c < 20 \text{ MPa} \quad (4)$$

$$E_{def} = 9 \times q_c^{0,6} \text{ [MPa]} \quad q_c \geq 20 \text{ MPa} \quad (5)$$

Určovanie hodnôt dynamickej penetrácie vychádzalo z korelačných vzťahov používaných spoločnosťou DPP Žilina s.r.o, ktorá poskytla výsledky dynamickej penetrácie vykonanej v záujmovom území:

Index uľahnutosti (DPT)

Index uľahnutosti pre dobre zmený piesok SW alebo štrk GW pri $Cu \geq 5$ nad hladinou podzemnej vody pre DPH prístroj sa odvodí [5]:

$$I_D = -0,14 + 0,55 \times \log N_{10} \tag{6}$$

kde N_{10} - počet úderov pre vniknutie hrotu o 10 cm (redukované).

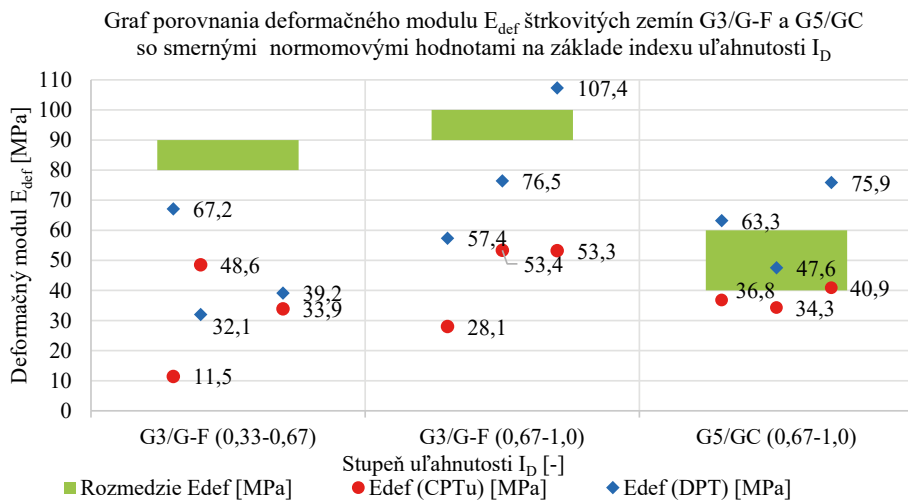
Deformačný modul (DPT)

$$E_{def} = n \times q_{dyn} [MPa] \tag{7}$$

kde $n=2,5$ pre piesčité zeminy; $5,0$ pre štrkovité zeminy.

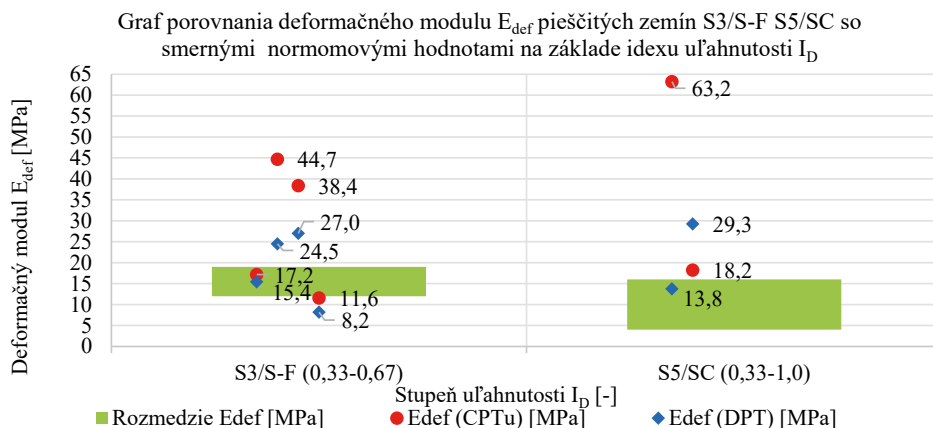
Celkový počet hrubozrnných zemín bol 15 vzoriek (6 vzoriek pre piesčité a 9 vzoriek pre štrkovité zeminy). Piesčité a štrkovité zeminy sa podľa smerných normových charakteristík zaraďujú na základe uľahnutosti do dvoch kategórií: I_D v rozsahu 0,33-0,67 a 0,67-1,0. Výsledné hodnoty E_{def} z vykonaných skúšok sa roztriedili do dvoch grafov a piatich skupín (viď. Obr. 4 a Obr. 5), kde je zobrazené rozmedzie deformačného modulu v ktorom by sa zeminy mali nachádzať zelenou farbou. Bodovo sú vyobrazené deformačné moduly penetračných skúšok (CPTu-červená farba, DPT-modrá farba).

Z Obr. 4 môžeme konštatovať, že výsledné E_{def} štrkovitých zemín G3/G-F sú podhodnotené z pohľadu oboch skúšok. Odporučil by som zvoliť iný typ korelácie pre tento typ zeminy (vážske štrky). Hodnoty zeminy G5/GC sa z pohľadu CPTu približujú k rozmedziu podľa smerných normových charakteristík. Pomer statického odporu q_c a dynamického odporu q_{dyn} sa pohyboval v intervale od 0,70- 2,42. Podľa [5] je pomer q_c/q_{dyn} v hrubozrnnom piesku a štrku väčší ako 1,0.



Obr. 4 Graf porovnania výsledkov deformačného modulu E_{def} zemín G3/G-F a G5/GC so smernými normovými hodnotami podľa STN 73 1001.

Z Obr. 5 môžeme konštatovať, že pre piesčité zeminy sú hodnoty E_{def} nadhodnotené (výraznejšie pri skúške CPTu). Pomer statického odporu q_c a dynamického odporu q_{dyn} sa pohyboval v intervale od 0,50- 4,76. Podľa [5] je pomer q_c/q_{dyn} v hlinito-piesčitých zemínach v rozpatí 0,75 až 0,3, čo sa nám z výsledkov nepotvrdilo.



Obr. 5 Graf porovnania výsledkov deformačného modulu E_{def} zemin S3/S-F a S5/SC so smernými normovými hodnotami podľa STN 73 1001

4 ZÁVER

Schopnosť určovať geotechnické parametre z penetračných skúšok CPT a DPT je nesporným prínosom pre geotechnickú prax. Nové korelácie je preto treba čo najlepšie spresniť spätnou väzbou resp. porovnať výsledné korelácie s priamymi metódami. Ďalšou veľkou výhodou je tiež rýchlosť získania výsledkov. V prezentovanej lokalite „Rýchlostná cesta R2 križovatka D1 – Trenčianska Turná“ môžeme vidieť výsledky a porovnanie dvoch penetračných skúšok. Z poznatkov môžeme povedať, že hodnoty E_{def} (získané z DPT a CPTu) štrkovitých zemin G3/G-F sú výrazne podhodnotené v porovnaní so smernými normovými charakteristikami. Preto by sme mohli zvoliť iný typ korelačnej rovnice pre vyhodnotenie E_{def} v danej lokalite resp. pre konkrétne vázske štrky. Pomer statického odporu q_c a dynamického odporu q_{dyn} je veľmi variabilný a nemožno ich považovať za porovnateľné parametre.

Použitie zdroje

- [1] DRUSA M. Improvement in Evaluation of Neogenous Soils by CPT Testing, Proceedings of SGEM 2012, ISSN 1314-2704 Vol II. p.151-158 DOI: 10.5593/sgem2012
- [2] MAYNE, P. W., Cone Penetration Testing State of Practice, Final Report NCHRP Project 20-05, Transportation Research Board, Washington 2007
- [3] Research project VEGA No. 1/4215/07 (2009) Evaluation of penetrating methods for determining the deformation properties of subsoil of transport constructions and their verification in geotechnical practice
- [4] ROBERTSON P.K., 1990. "Soil Classification Using the Cone Penetration Test." Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, No. 1, 151-158.
- [5] STN 72 1032 Dynamická penetračná skúška (1997)
- [6] STN 73 1001 Zakladanie stavieb. Základová pôda pod plošnými základmi (1987)
- [7] VLČEK J., BULKO R.,: Determination of advanced parameters of constitutive models of soils using cone penetration test (CPT). In: WMESS 2015: world multidisciplinary earth sciences symposium 2015: September 2015, Prague (Czech republic). - ISBN 978-80-970698-4-1. - CD-ROM, s. 104.
- [8] BULKO R., KAIS L., VLČEK J.,: Použitie statickej penetračnej skúšky pre určovanie geotechnických parametrov. In: Nové poznatky v geotechnickom inžinierstve: Kočovce 21.-22. január 2014. - Bratislava: STU, 2014. - ISBN 978-80-227-4123-1.
- [9] BULKO R., DRUSA M., VLČEK J., MEČÁR M.,: CPT profiling and laboratory data correlations for deriving of selected geotechnical parameter. In: Civil and environmental engineering = Stavebné a environmentálne inžinierstvo: scientific technical journal. - ISSN 1336-5835. - Vol. 11, no. 2 (2015).

MOŽNOSTI OPTIMALIZACE VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ BETONU S OBSAHEM BETONOVÉHO RECYKLÁTU

POSSIBILITIES OF OPTIMIZING SELECTED PROPERTIES OF CONCRETE CONTAINING CONCRETE RECYCLED AGGREGATE

Věra Sikorová^{*1}

*xsikorovav@vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00, Brno

Abstrakt

Beton je významným stavebním materiálem, v současnosti nejpoužívanějším, avšak s nepříznivým dopadem na životní prostředí. Příspěvek se proto zabývá studiem vlastností betonu, v jehož složení je přírodní kamenivo částečně nahrazeno kamenivem recyklovaným. Cílem článku je porovnání možností úpravy vlastností betonu s obsahem betonového recyklátu.

Klíčová slova

Beton, udržitelnost, přírodní kamenivo, recyklované kamenivo, betonový recyklát

Abstract

Concrete is an important construction material, currently the most widely used. However, it has an adverse environmental impact. That is why the article deals with the properties of concrete in whose composition natural aggregate is partly replaced with recycled aggregate. The aim of the article is to compare possibilities of adjusting the properties of concrete with the content of concrete recycled aggregate.

Key words

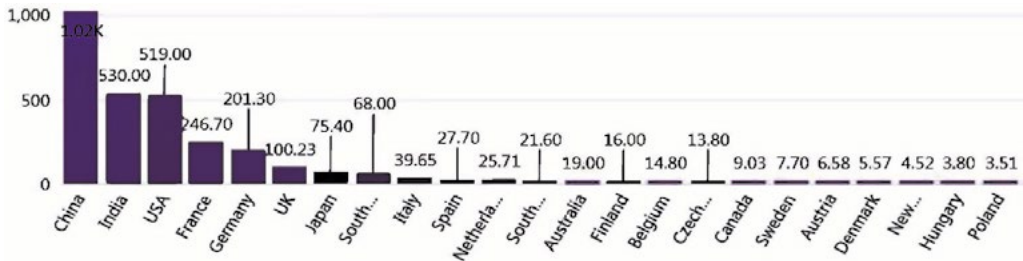
Concrete, sustainability, natural aggregate, recycled aggregate, concrete recycled aggregate

1 ÚVOD

V současné době je kladen velký důraz na trvanlivost a trvalou udržitelnost stavebních materiálů a současně snižování jejich dopadu na životní prostředí, konkrétně snižováním emisí, množství vyprodukovaného odpadu a recyklací již vzniklých materiálů. Výroba betonu a produkce stavebního a demoličního odpadu představuje stálý přírůstek emisí oxidu uhličitého do atmosféry (Obr. 1).

Množství recyklovaného kameniva, které je možné zahrnout do stavebních konstrukcí, se pohybuje v rozmezí 10–25 % podle legislativních nařízení. Norma ČSN EN 206+A1 [1] povoluje použití recyklovaného kameniva jako kameniva do betonu, a to pro konstrukce, které nemusí odolávat vlivu prostředí (vlivu chloridů, mrazu atd.). Recyklovaná kameniva se v současnosti používají především v silničním stavitelství. Při hodnocení recyklovaného kameniva z hlediska jeho kvality je nicméně nutné uvažovat s velkým množstvím proměnných, jako je pevnost původního betonu, odolnost kameniva proti drcení, nasákavost, množství jemných částic a nečistot, objemová hmotnost vysušeného kameniva, tvarový index kameniva atd. Kvalitu betonu s obsahem recyklovaného kameniva tedy významně ovlivňují vlastnosti tohoto recyklovaného kameniva, způsob demolice a důslednost třídění a celková kvalita recyklace [2].

Pro potřeby experimentu byly vyrobeny betony obsahující různé množství betonového recyklátu a byly hodnoceny jejich pevnostní charakteristiky a odolnost vůči účinkům degradace na základě stanovení kvality jejich povrchové vrstvy.

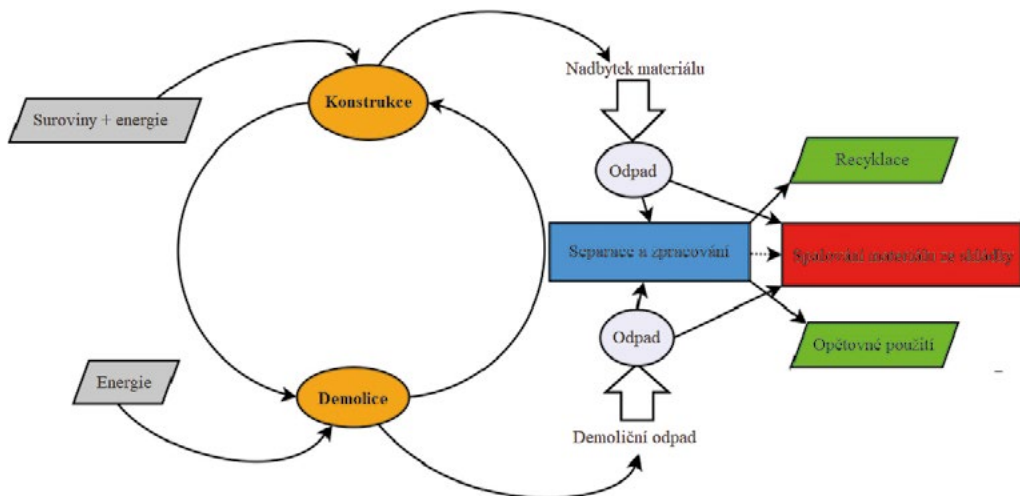


Obr. 1 Celosvětový trend produkce stavebního a demoličního odpadu v milionech tun [3].

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Výsledkem stavebních a demoličních činností (Obr. 2) je široká škála materiálů, včetně betonu, skla, dřeva, kovů a některých nebezpečných prvků, jejichž segregace je složitá. Sklo, dřevo a kov lze recyklovat i přímo, avšak betonový odpad je nutno dále zpracovat. Hlavní částí tohoto odpadu, získaného pomocí drcení a třízení, je recyklované kamenivo, které má obecně horší vlastnosti než kamenivo přírodní.

Nahrazení přírodního kameniva recyklovaným v receptuře betonu je jednou z možností, jak zlepšit udržitelný rozvoj stavebnictví a snížit negativní dopady na životní prostředí. Při nahrazování přírodního kameniva recyklovaných je nicméně potřeba rozvážného přístupu, zejména pokud je kamenivo nahrazováno v recepturách betonů. Vlastnosti recyklovaného kameniva mohou zásadně ovlivnit parametry výsledného betonu, a to většinou bohužel negativně. Ekologická výhodnost použití recyklovaného kameniva pak závisí velkou měrou na transportní vzdálenosti a energetické náročnosti přeměny původního betonu na toto recyklované kamenivo.



Obr. 2 Schéma oběhu stavebních hmot v průběhu životního cyklu stavebního díla [3].

3 METODIKA

Cílem experimentu bylo porovnání referenčního a tří modifikovaných betonů, kde byla jedna z frakcí přírodního kameniva nahrazena určitým množstvím recyklovaného kameniva, konkrétně betonového recyklátu odpovídající frakce. Betonový recyklát frakce 0/8 byl roztříděn na frakce 0/4 a 4/8.

Následně byla provedena rešerše srovnání vlastností betonů s recyklovaným kamenivem obsahující navíc další složky s cílem zlepšení vybraných vlastností těchto betonů.

Zkušební tělesa

Byly připraveny čtyři záměsi betonu (receptury jsou uvedeny v Tab. 1), navržené na pevnostní třídu C25/30, stupeň vlivu prostředí XF2 a konzistenci S3. První beton byl referenční (označen jako R0) a obsahoval pouze přírodní kamenivo, ve druhém (R10) bylo nahrazeno 10 hm. % přírodního kameniva frakce 4/8 recyklovaným kamenivem téže frakce, ve třetím (R20) bylo nahrazeno 20 hm. % a ve čtvrtém (R30) bylo nahrazeno 30 hm. % přírodního kameniva.

Při výrobě betonu byl kladen důraz na zachování totožné konzistence – S3, přičemž reálné sednutí kužele se pohybovalo v rozmezí (110 ± 10) mm. Z každé záměsi bylo vyrobeno devět krychlí o hraně 150 mm, které byly uloženy do plastových forem s víkem a ponechány v laboratoři 48 hodin. Poté byly odformovány a uloženy ve vodní lázni po dobu 28 dní, kdy byly provedeny porovnávací zkoušky.

Tab. 1 Reálné složení zkoušených betonů v přepočtu na 1 m³.

Označení betonu	R0	R10	R20	R30
CEM I 42,5 R Hranice [kg]	380	380	380	380
Písek 0-4 mm [kg]	905	905	905	905
Kamenivo 4-8 mm [kg]	195	175	155	135
Recyklát 4-8 mm [kg]	0	20	40	60
Kamenivo 8-16 mm [kg]	655	655	655	655
Voda záměsová [kg]	99	85	90	110
Voda v kamenivu [kg]	68	69	70	71
Plastifikátor [kg]	2,8	2,8	2,8	2,8
Provzdušňovací přísada [kg]	0,5	0,5	0,5	0,5

Zkušební metody

Jako porovnávací zkoušky betonu byly zvoleny stanovení pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [4], stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou dle ČSN EN 12390-8 [5] a stanovení odolnosti betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek metodou A dle ČSN 73 1326 [6].

4 VÝSLEDKY

Tab. 2 uvádí vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu, konkrétně objemovou hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350-6 [7], konzistenci čerstvého betonu pomocí zkoušky sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2 [8], objemovou hmotnost ztvrdlého betonu, pevnost v tlaku, odolnost betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek metodou A a hloubku průsaku tlakovou vodou.

Tab. 2 Parametry čerstvého a ztvrdlého betonu.

Označení betonu	R0	R10	R20	R30
Sednutí [mm]	110	120	110	100
Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m ³]	2 230	2 270	2 260	2 170
Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [kg/m ³]	2 170	2 290	2 250	2 180
Pevnost v tlaku [MPa]	40,6	52,5	48,5	39,2
Odpad po 100 c. [g/m ²]	1386	2495	2111	1760
Hloubka průsaku [mm]	10	10	9	10

5 DISKUZE

Hodnoty odpadů po 100 zmrazovacích cyklech vykazují nečekaně vysoké rozdíly ve výsledcích jednotlivých betonů. Stanovení odolnosti povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek metodou A je poměrně složitou zkouškou a interpretace je mnohdy složitá, zejména s přihlédnutím k hodnotám opakovatelnosti a reprodukovatelnosti.

Naopak hodnoty hloubky průsaku tlakovou vodou byly téměř totožné a odpovídaly betonu XF2, kde je stanovena mezní hodnota průsaku 35 mm pro beton s předpokládanou životností 100 let.

Z hodnot vyplývá, že použití recyklovaného kameniva v receptuře sice zvyšuje pevnosti v tlaku betonu, ovšem v tomto případě na úkor kvality povrchové vrstvy betonu, a tedy jeho pravděpodobné trvanlivosti. Výsledky popisovaného experimentu však není možné zobecnovat.

Existuje však mnoho publikovaných studií, zkoumajících vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem a zároveň obsahující přísadu, která má potenciál zlepšit určité charakteristiky tohoto betonu.

Bylo zjištěno, že 2% přídavek metakaolinu v betonu zvyšuje pevnost betonu až o 60 % oproti referenčním vzorkům [9]. V případě samozhutitelného betonu bylo dosaženo zvýšení pevnosti v tlaku, tahu i ohybu, konkrétně při přídavku 15 % metakaolinu v betonu s recyklovaným kamenivem [10].

Popílek je jedním ze známých latentně hydraulických materiálů, který se používá od začátku minulého století a v současnosti se celosvětově vyrábí v milionech tun. Bylo zjištěno, že 10% přídavek popílku způsobil vyšší pevnost v tlaku u betonů s různým podílem recyklovaného kameniva oproti referenci a 20% přídavku popílku [11]. Na druhou stranu jiné studie uváděly pokles pevnosti v tlaku a meze pevnosti v tahu při 25% a 35% nahrazení cementu popílkem. Po 90 dnech však došlo ke zvýšení pevnosti v tlaku [12].

Při 10% přídavku mikrosiliky do betonu s recyklovaným kamenivem frakce 4–12 mm došlo k významnému zlepšení mechanických vlastností tohoto betonu a také oproti 5% přídavku došlo ke snížení absorpce vody [13].

Nanomateriály zlepšují fyzikální a chemické vlastnosti betonu. Různé typy nanomateriálů – nanočástice [14], nanotrubičky [15] a nanovrstvy [16] zvyšují pevnosti betonu, avšak nevýhody spočívají ve vysokých nákladech a optimální disperzi nanomateriálů v betonu.

Při porovnání portlandského cementu a vysokopecního struskového cementu v betonu s recyklovaným kamenivem a porovnání sladké a mořské vody jako záměsové vody, bylo zjištěno, že kombinace vysokopecního struskového cementu a mořské vody v záměsi vedla k podobnému počátečnímu a konečnému času tuhnutí betonu jako u betonu z běžného portlandského cementu s přírodním kamenivem, ale zvýšilo se smrštění. Ačkoliv se pevnost v tlaku (Tab. 3) snižovala s přírůstkem recyklovaného kameniva v betonu, mořská voda pomohla snížit tento účinek [17].

Tab. 3 Vliv vysokopecního struskového cementu na pevnost v tlaku betonů s recyklovaným kamenivem.

Označení betonu	I-N	I-R20	I-R50	I-R100	III-N	III-R20	III-R50	III-R100
Pevnost v tlaku (sladká voda) [MPa]	61,5	49,5	48,8	32,8	57,5	53,6	49,5	40,5
Pevnost v tlaku (mořská voda) [MPa]	61,5	50,4	50,2	36,7	64,3	61,3	53,6	40,5

6 ZÁVĚR

Na základě provedeného experimentu lze konstatovat, že se u použitého betonu částečná náhrada přírodního kameniva neosvědčila. Betony s recyklovaným kamenivem sice vykazovaly vyšší pevnost v tlaku, avšak horší výsledky trvanlivostních zkoušek.

Negativní efekty při použití recyklovaného kameniva v betonu je možno dále ovlivňovat pomocí různých přísad. Zpracování kameniva včetně separace jemného a hrubého kameniva, a především odstranění přilnuté malty, je energeticky náročné, přesto zásadní pro snížení pórovitosti tohoto kameniva a přiblížení jeho kvality přírodnímu kamenivu.

Je zapotřebí dalšího výzkumu v oblasti podrobné analýzy dopadů využití betonu s recyklovaným kamenivem. Dále je třeba zavést standardy kvality pro jeho použití v potenciálních aplikacích. Je třeba vyvinout účinné a nákladově efektivní metody ošetření, aby se zlepšily vlastnosti betonu s recyklovaným kamenivem ve fázi zpracování.

Následující výzkum bude zaměřen na přídavek metakaolinu do receptury za účelem optimalizace vlastností tohoto betonu s recyklovaným kamenivem.

Poděkování

Príspevek vznikl za podpory fakultního specifického výzkumu VUT, "Vliv vlastností recyklovaných kameniv na životnost a udržitelnost betonových konstrukcí" (FAST-J-20-6459).

Použité zdroje

- [1] ČSN EN 206+A1: Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: ČAS, 2018.
- [2] Tam V., Soomro M., Evangelista A. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*, 2018, 172, 272-292.
- [3] Akhtar A., Sarmah A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective, *Journal of Cleaner Production*, 2018, Volume 186, pp. 262-281, ISSN 0959-6526.
- [4] ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [5] ČSN EN 12390-8: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [6] ČSN 73 1326: Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Praha: ČNI, 1984.
- [7] ČSN EN 12350-6: Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [8] ČSN EN 12350-2: Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [9] Shen, J., Xie, Z., Griggs, D., Shi, Y. Effects of Kaolin on the engineering properties of Portland cement concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, Volumes 174-177, pp. 76-81.
- [10] Hassan, A.A.A., Ismail, M.K., Mayo, J. Mechanical properties of selfconsolidating concrete containing lightweight recycled aggregate in different mixture compositions. *Journal of Building Engineering*, 2015, Volume 4, pp. 113-126.
- [11] Sowmith, N., Babu, P.S.S.A. Influence of fly ash on the performance of recycled aggregate concrete. *International Journal of Science and Research*. 2016, Volume 5, pp. 1740-1744.
- [12] Kou, S.C., Poon, C.S., Chan, D. Influence of fly ash as a cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007, Volume 19, pp.709-717.
- [13] Çakır, Ö., Sofyanlı, Ö. Ö. Influence of silica fume on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete. *HBRC Journal*. 2015, Volume 11, pp. 157-166.
- [14] Li, W., Luo, Z., Long, C., Wu, C., Duan, W.H., Shah, S.P. Effects of nanoparticle on the dynamic behaviors of recycled aggregate concrete under impact loading. *Materials & Design*. 2016, Volume 112, pp. 58-66.
- [15] Yazdanbakhsh, A., Chu, C. The effect of carbon nanofibers on the strength of concrete with natural and recycled aggregates. *Nanotechnology in Construction*. 2015, pp. 277-283.
- [16] Pan, Z., He, L., Qiu, L., Korayem, A.H., Li, G., Zhu, J.W., Collins, F., Li, D., Duan, W.H., Wang, M.C. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite. *Cement and Concrete Composites*. 2015, Volume 58, pp. 140-147.
- [17] Etxeberria M., Gonzalez-Corominas A. Pardo P. Influence of seawater and blast furnace cement employment on recycled aggregate concretes' properties. *Construction and Building Materials*, 2016, Volume 115, pp. 496-505, ISSN 0950-0618.

ÚPRAVA BETONOVÉHO RECYKLÁTU A Z NĚJ PŘIPRAVENÉHO BETONU EPOXIDOVOU DISPERZÍ I SILIKÁTOVÝMI PŘÍMĚSEMI

TREATEMENT OF RECYCLED CONCRETE AND CONCRETE PREPARED FROM IT WITH EPOXY DISPERISON AND SILICATE ADMIXTURES

Jana Knapová^{*,1}, Michal Stehlík¹

^{*}jana.knapova@vutbr.cz

¹Ústav stavebního zkušebnictví, FAST VUT v Brně, Veverí 95, 602 00 Brno, ČR

Abstrakt

Vzhledem k nedostatku neobnovitelných zdrojů a vysokým cenám energií se opětovné použití betonu jeví jako velmi žádoucí. Obecně je známo, že betony z recyklovaného betonu jen těžko dosahují vlastností původních betonů. Povrchová úprava nezralých “zelených betonů” a samotného betonového recyklátu penetrací epoxidovou disperzí a možným přidáním disperze a silikátové příměsi do záměsové vody by mohla přispět ke zlepšení fyzikálně-mechanických vlastností betonů vyrobených z recyklovaného betonu.

Klíčová slova

Betonový recyklát, epoxidová disperze, receptura betonu, recyklovaný beton, silikátové přísady

Abstract

Due to a lack of non-renewable resources and high prices of energies, the reuse of concrete seems to be more than desirable. It is common knowledge that in concretes made of recycled concrete the properties of the original concretes can hardly be achieved. The surface treatment of fresh “green concretes” and pure concrete recyclete by means of penetration with dispersion epoxides and potential addition of the dispersion and silicate admixture into batching water might hopefully contribute to improving physical-mechanical properties of concretes made from recycled concrete.

Key words

Recycled concrete, epoxy dispersion, concrete recipe, silicate admixtures

1 ÚVOD

Dnes je již zřejmé, že prosté betony z recyklovaného betonu velmi těžko dosahují vlastností původních betonů [1]. Jednou z možných variant jejich vylepšení může být využití moderních bezrozpouštědlových epoxidových disperzí [2], [3]. Tyto mohou vylepšit jednak adhezní vlastnosti cementového tmele, spojujícího betonový recyklát, jednak, naneseny na suchý recyklát, mohou pozitivně ovlivnit jeho vysokou nasákavost. Adice popílku, strusky, mikrosiliky i v kombinaci s epoxidovou disperzí, by mohla být další variantou možného zlepšení kvalitativních vlastností betonu z betonového recyklátu.

Cílem výzkumu je I. prověření fyzikálně mechanických vlastností betonů z betonového recyklátu, na jejichž nezralý povrch (“fresh concrete”) byla aplikována vrstva epoxidového nátěru; II. prověření možnosti vylepšení fyzikálních vlastností betonového recyklátu povrchovou penetrací epoxidovou disperzí včetně následného posouzení tlakové pevnosti betonu vyrobeného z takto upraveného recyklátu; III. prověření očekávaných změn mechanických vlastností vzorků betonu z betonového recyklátu při variantní adici přísad a příměsí do suché záměsi i záměsové vody.

Prioritně bude zkoušena pevnost v tlaku po 28 dnech zrání ve vlhkém uložení na normových betonových krychlicích o rozměrech 150×150×150 mm. Výsledné hodnoty pevností budou porovnány s ohledem na sledované změny pevností betonů po adici rozdílné příměsi bez nebo s přísadou polymerní disperze vzhledem k sadě referenční. Stanovení tlakové pevnosti betonu z betonového recyklátu bylo vybráno záměrně, neboť velká část

pracovišť se dosud zaměřila na úpravu převážně fyzikálních vlastností betonu z betonového recyklátu, tedy smrštitelnosti, mrazuvzdornosti, vodního součinitele, vyluhovatelnosti apod. [4]. Přitom zvýšení pevnostní třídy betonu z betonového recyklátu je podmínkou nejen pro efektivnější znovu užití betonového recyklátu např. do konstrukčních betonů, ale i nepřímo pro zvýšení životnosti konstrukce [5].

2 METODIKA

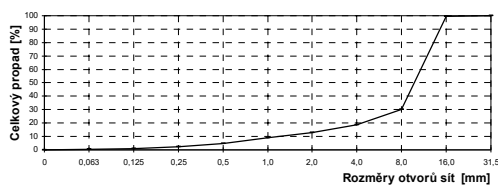
Část I.

První část prověřuje *fyzikálně mechanické vlastnosti betonů z betonového recyklátu, na jejichž nezralý povrch ("fresh concrete") je aplikována vrstva nátěru epoxidové disperze CHS Epoxy 160V55, včetně tvrdidla Telatit 1261. Disperzní epoxid bude aplikován na povrch vzorků starých jen 7 dní od data výroby. Tyto zkušební vzorky by měly být vystaveny obdobné nepřizní prostředí, jak tomu bývá v praxi na mnohých konstrukcích, tzn. že beton by neměl být v týdenním zrání ani později po aplikaci uložen ve vlhkém uložení, ani jinak ošetřován. Primárně bude zjišťováno smršťování – dilatace na trámčích 100×100×400 mm.*

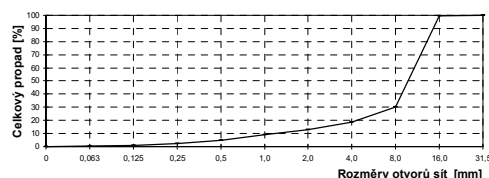
Část II.

Druhá část se zaměřuje na možnosti *vylepšení fyzikálních vlastností betonového recyklátu povrchovou penetrací epoxidovou disperzí. Hrubé kamenivo v betonových vzorcích bylo nahrazeno betonovým recyklátem. Povrch tohoto plniva byl upraven epoxidovou disperzí a následně budou zkouškami zjišťovány tlakové pevnosti betonu vyrobeného z takto upraveného recyklátu. Účelem povrchové ochrany recyklátu bylo snížení jeho nasákavosti a tím snaha zvýšit tlakové pevnosti betonu z recyklovaného betonu. Pokusy jsou prováděny s betonovým recyklátem frakce 0-16 mm, dodaným firmou Dufonev, s.r.o.*

Dle ČSN EN 206+A1 „Beton – část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda“ se jedná o recyklované kamenivo typu 1 (drť nebo písek vyrobený drcením pouze betonu, tzv. betonová drť), které lze výhradně použít do betonu z recyklovaného kameniva [6]. Nasákavost dodaného betonového recyklátu je stanovena dle ČSN EN 1097-6 „Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti“ a odpovídá 10,5 % hmotnostního podílu po 10 minutách [7]. Přípustná normová hodnota nasákavosti betonového recyklátu typu 1 činí ale pouze 10 % hmotnostního podílu. Křivka zrnitosti na Obr. 1 prozrazuje přibližně 19% obsah frakce 0–4 mm, což vyhovuje podmínkám všeobecně použitelného betonu z betonového recyklátu [8]. Mezerovitost směsi kameniva pro přípravu referenčního betonu bez recyklátu (receptura RI) činila 25 %. Jednalo se o směs: 40 % frakce 0–4 mm, 60 % frakce 4–16 mm, z toho 20 % frakce 4–8 mm a 80 % frakce 8–16 mm.



Obr. 1 Křivka zrnitosti surového recyklátu firmy Dufonev frakce 0–6 mm.



Obr. 2 Křivka zrnitosti disperzí penetrovaného recyklátu firmy Dufonev původní frakce 0–16 mm, nyní po aglomeraci 4–32 mm.

Tab. 1 Receptury betonových záměsí II.

Receptura R1 – referenční	CEM II 32,5/B–S R 300 kg/m ³ , 0–4 Bratčice 760 kg/m ³ , 4–8 Tovačov 228 kg/m ³ , 8–16 Olbramovice 912 kg/m ³
Receptura RII – penetrovaný recyklát	CEM II 32,5/B–S R 300 kg/m ³ , 0–4 Bratčice 760 kg/m ³ , 4–8 Tovačov 228 kg/m ³ , 4–32 penetrovaný bet. rec. 690 kg/m ³
Receptura RIII – surový recyklát	CEM II 32,5/B–S R 300 kg/m ³ , 0–4 Bratčice 760 kg/m ³ , 4–8 Tovačov 228 kg/m ³ , 0–16 surový bet. rec. 690 kg/m ³

Za účelem penetrace vodou ředitelné epoxidové disperze (CHS Epoxy 160V55 + tvrdidlo Telalit 1261, poměr mísení 100 : 11,5) do povrchu recyklovaného betonu bylo nutno recyklát vysušit a po vychladnutí ponořit do vodou naředěné (disperze : voda = 2 : 1 objemově) disperze, předem promíchané s předepsanou dávkou tvrdidla [2], [9]. K odstranění přebytku kapalně disperze (včetně části vmišovaných jemných částic) bylo použito normové síto o rozměru oka 0,5 mm. Disperzi obalený recyklovaný beton byl uložen na PE fólii, kde proběhla penetrace, proschnutí a zatvrdnutí tenkého povrchového emulzního filmu. Po třech dnech bylo takto upravené kamenivo použito k přípravě jedné varianty testovaného betonu z betonového recyklátu (receptura RII). Obr. 2 dokumentuje rozdíl v zrnitosti recyklátu napenetrovaného epoxidovou disperzí a surového betonového recyklátu, který obsahuje přibližně 19 % jemné frakce 0–4 mm. V případě povrchově ošetřeného recyklátu disperzí je zřejmé, že kapalná disperze během mísení se surovým recyklátem pohltí většinu jemnozrnné frakce a po vzájemném slepení disperzí obalených zrn a zatvrdnutí dojde ke vzniku větších aglomerátů frakce 4–32 mm [10].

Část III.

Třetí část výzkumu se zaměřuje na možnosti úpravy betonu z betonového recyklátu rozdílnou adicí přísad a příměsí do suché záměsí i záměsivé vody. A následně sleduje dopad na mechanické vlastnosti vzorků. V této části výzkumu byl zvolen následující postup:

Původní hrubé kamenivo do betonu bylo nahrazeno neupraveným (přírodním) betonovým recyklátem alternativně s příměsí strusky, popílku a siliky bez nebo s přísadou epoxidové disperze. Tab. 2 obsahuje receptury referenčního betonu z hrubého kameniva (Rec. R1) a základního betonu ze surového (neupravovaného) betonového recyklátu frakce 0–16 mm (rec. R2 a základ receptur R3–R6). Beton dle receptury R3 obsahuje navíc příměs 30 % mleté vysokopecní strusky z hmotnosti cementu, R4 obsahuje 30 % popílku, R5 10 % průmyslové mikrosiliky a R6 směsnou příměs 30 % popílku a 10 % mikrosiliky. Každá z betonových záměsí pod označením R1–R6 byla připravena ve dvou variantách, a sice bez adice disperze a s 12% adicí vodou ředitelné epoxidové disperze, dávkované do původní betonové směsi. Skladba betonové směsi receptury R1 (hutné kamenivo) byla navržena na pevnostní třídu C 35/45, receptury R2–R6 (recyklovaný beton) na pevnostní třídu C 25/30, obojí při konzistenci S1 (10–40 mm sednutí kužele dle EN 12350-2).

Dle každé receptury (s i bez adice epoxidové disperze) bylo vyrobeno 6 kusů zkušebních krychlí rozměrů 150×150×150 mm, tedy celkem 36 krychlí. Vždy první tři krychle ze záměsí R1–R6 byly vyrobeny z betonu bez adice epoxidové disperze, poté byla vždy přidána disperze s tvrdidlem v množství 12 % z hmotnosti cementu a zbylá záměs byla znovu homogenizována. Přídavek disperze způsobil pokles konzistence z S1 na stupeň S3 sednutí kužele (100–150 mm). Množství 12 % disperze z hmotnosti cementu je limitní dávka disperze, která dle předchozích výzkumů vlastních i rešeršovaných ještě výrazně nesníží tlakovou pevnost PCC betonů. Vodou ředitelná epoxidová disperze nové generace skladby EP CHS Epoxy 160V55 a příslušné tvrdidlo Telalit 1261 byly dodány firmou Synpo Pardubice, a.s. Poměr mísení složek je výrobcem stanoven na 100:11,5 hmotnostně. V Tab. 2 jsou uvedeny tři základní frakce hrubého kameniva pro přípravu referenčního betonu. Pro přípravu betonu z recyklovaného betonu bylo hrubé kamenivo frakce 8–16 mm Olbramovice nahrazeno betonovým recyklátem frakce 0–16 mm firmy Dufonev. Záměsí pod označením R3 až R6 byly modifikovány příměsemi strusky, popílku a mikrosiliky.

Tab. 2 Receptury betonových záměsí III.

Receptura R1 – referenční	CEM I 42,5 R 300 kg/m ³ , 0–4 Bratčice 760 kg/m ³ , 4–8 Tovačov 228 kg/m ³ , 8–16 Olbramovice 912 kg/m ³
Receptura R2 + základ R3–R6 – surový recyklát	CEM I 42,5 R 300 kg/m ³ , 0–4 Bratčice 760 kg/m ³ , 4–8 Tovačov 228 kg/m ³ , 0–16 surový bet. rec. 690 kg/m ³

3 VÝSLEDKY

Část I.

V Tab. 3 jsou zobrazeny dilatace měřené na zkušebních trácích. Průběžné i závěrečné dilatace jsou u nátěrem upraveného betonu výrazně nižší než u betonu bez úprav.

Tab. 3 Dilatace, měřená na základnách 100 mm u tráců 100×100×400 mm.

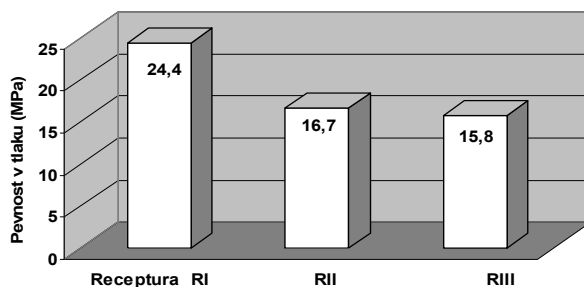
Stáří vzorku po aplikaci nátěru CHSEpoxy 160V55	Aplikace disperzního nátěru	Průměrná dilatace základen 100 mm u tří vzorků (mm)	Průměrná dilatace základen 100 mm u tří vzorků
3 dny	ano	0,0182	111 % ze 100 % bez aplikace nátěru
	ne	0,0164	100 %
14 dní	ano	0,0458	68,9 %
	ne	0,0665	100 %
28 dní	ano	0,0450	64,4 %
	ne	0,0699	100 %

Část II.

Mělká penetrace a tenký disperzní film, pokrývající povrch betonového recyklátu, výrazným způsobem snížily nasákavost stanovenou po 10 minutách (dle ČSN EN 1097-6), a sice z původní hodnoty 10,5 % na hodnotu 6 %.

Z mechanických a přetvárných vlastností byla primárně stanovena pevnost v tlaku. Zkoušky byly prováděny na krychlích o rozměrech 150×150×150 mm vyrobených z čerstvého betonu receptur RI, RII a RIII. U zkušebních krychlí byly testovány tlakové pevnosti po 28 dnech vlhkého uložení, viz. Obr. 3.

28 denní pevnost betonu v tlaku, vlhké uložení

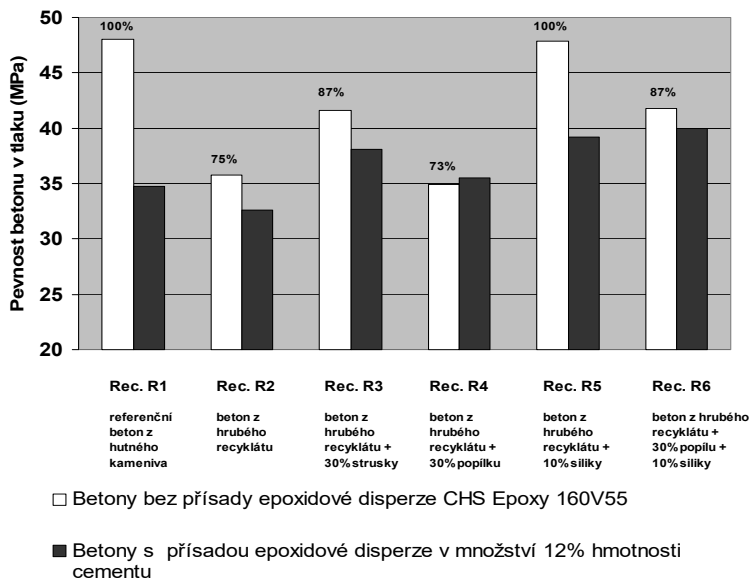


Obr. 3. Pevnost v tlaku betonu po 28 dnech vlhkého uložení.

Část III

Změnu tlakových pevností betonů z betonového recyklátu po adici různých přísad a variantně epoxidové disperze graficky dokumentuje Obr. 4. Je nutné poznamenat, že zkušební krychle rozměru 150×150×150 mm byly po odformování uloženy 27 dní ve vlhkém uložení – 12% obsah epoxidové disperze vylučuje vodní uložení z důvodu možného výluhu.

Pevnosti betonů z recyklovaného betonu po 28 dnech vlhkého uložení



Obř. 4 Změna tlakových pevností betonů z recyklovaného betonu po adici přísad a příměsí.

4 DISKUZE

Část I.

Výzkum prokázal, že nátěr povrchu betonu z recyklovaného betonu ve stáří 7 dní (tzv. “green concrete”) moderní bezrozpuštědlovou epoxidovou disperzí CHS Epoxy 160V55 výrazně sníží jeho smrštění. Z Tab. 1 je zřejmé, že smrštění u natřených prvků je více než o třetinu nižší než u neupravených vzorků. Tento jev je pro stavaře potěšitelný vzhledem k nižší možnosti vývinu smršťovacích trhlin.

Část II.

Výzkum části II byl zaměřen na vylepšení jakosti betonového recyklátu, potažmo betonu připraveného z vylepšeného betonového recyklátu. Co se týče disperzí penetrovaného betonového recyklátu, bylo zjištěno:

- Povrchová disperzí napenetrovaná vrstvička betonového recyklátu typu 1 sníží původní kritickou nasákavost prostého recyklátu z 10,5 % na příznivou hodnotu 6 %. Požadavek ČSN EN 206+A1 na maximální nasákavost po 10 minutách činí 10 %. K napenetrování recyklátu je použita moderní bezrozpuštědlová disperze CHS Epoxy 160V55 + tvrdidlo Telalit 1261.

Na základě porovnání pevností betonů s přírodním a disperzí upraveným betonovým recyklátem a pevností referenčního betonu s přírodním kamenivem je možno přijmout tyto závěry:

- Tlakové pevnosti betonů z betonového recyklátu přírodního a penetrovaného byly oproti pevnosti referenčního betonu z přírodního kameniva nižší o přibližně 1/3.
- Byl prokázán mírně pozitivní vliv povrchového napenetrování betonového recyklátu typu 1 na výslednou tlakovou pevnost betonu z betonového recyklátu.

Moderní vodou ředitelné epoxidové disperze nové generace lze úspěšně použít k impregnaci povrchu již zatvrdlého betonu [11], [12] a dosáhnout maximální ochrany před negativními vlivy vlhkosti a kyselých plynů.

Část III.

Výzkum části III byl zaměřen na vylepšení jakosti betonu z přírodního betonového recyklátu variantní adicí přísad a příměsí. Porovnáním dosažených 28denních tlakových pevností betonu referenčního a betonů vyrobených z betonového recyklátu lze přijmout tyto závěry:

- Tlakové pevnosti betonu ze surového betonového recyklátu (R2) a referenčního betonu (R1) jsou v poměru 0,75/1. Tento poměr je dlouhodobě znám a fakticky omezuje použití recyklovaného betonu jako kameniva do konstrukčních betonů.
- 10% příměs mikrosiliky výrazně zvýší pevnosti betonu z recyklovaného betonu (R5) až na úroveň pevnosti referenčního betonu (R1).
- 30% příměs vysokopecní strusky zvýší pevnost betonu z recyklovaného betonu (R3), nárůst ale není tak výrazný v porovnání s mikrosilikou (R5).
- Vliv 30% adice popílku je negativní (R4), tlaková pevnost poklesla na 75 % referenční pevnosti R1.
- Kombinovaná příměs 30 % popílku a 10 % mikrosiliky (R6) nesplnila očekávání, 28denní pevnosti jsou nižší ve srovnání s adicí jen 10 % mikrosiliky (R5).
- Přísada 12 % epoxidové disperze (R...E) snížila 28denní pevnost betonu referenčního i betonů z recyklátu. Na vině je zvýšení tekutosti betonové směsi po adici disperze, kdy sedimentace kužele vzrostla ze třídy S1 na třídu S3. V případě oddělené přípravy záměsí bez a s epoxidovou disperzí a dodržení třídy sedimentace S1 by byl pozorován pravděpodobně nulový efekt adice disperze na vylepšení tlakové pevnosti betonu z recyklovaného betonu.

5 ZÁVĚR

Na základě naměřených výsledků lze říct, že vylepšení tlakové pevnosti betonů z recyklovaného betonu je možno docílit vhodnou příměsí na minerální bázi – osvědčila se 10% adice mikrosiliky. Otazník zůstává nad cenou, jež mikrosiliky částečně diskvalifikuje už při první úvaze. Lze též konstatovat, že penetrace betonového recyklátu epoxidovou disperzí výrazně zlepšila jeho fyzikální vlastnosti a přispěla ke snížení vodního součinitele míchaného betonu. Disperzní přísada, dávkovaná do záměsové vody, zlepšila zpracovatelnost betonových směsí, urychlila náběh jejich počátečních pevností, vylepšila jejich adhezivní a přetvárné vlastnosti, ale výrazně nezvýšila tlakovou pevnost zrajících betonů, viz též [13], [14], [15]. Dosažené výsledky se zdají být optimistické a vybízí k dalším testům fyzikálních a trvanlivostních vlastností. V úvahu přichází test povrchové propustnosti pro plyny metodou Torrent, test propustnosti pro vodu metodou GWT či ISAT, test difuzních vlastností či test na hloubku karbonatace.

Použitá literatura

- [1] MLČOCHOVÁ, V.: Nové poznatky z oblastí recyklace betonů, Recycling 2006, sborník přednášek 11. ročníku konference, Vysoké učení technické v Brně, březen 2006, ISBN 80-214-3142-3.
- [2] NOVÁK, J. a kol.: Příprava epoxidových disperzí, Vodou ředitelné epoxidové disperze nové generace, Zpráva o stavu řešení projektu FT-TA3/056, Synpo Pardubice, prosinec 2006.
- [3] HENNING, O.; LACH, V.: Chemie ve stavebnictví, Praha, SNTL, 63–69, 1983.
- [4] GÓMEZ-SOBERÓN, J., M., V.: Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate, Cement Concr Res 32: 1301–1311, 2002.
- [5] MATOUŠEK, M.; DROCHYTKA, R.: Atmosférická koroze betonu, Praha, IKAS+ČKAIT, 10–75, 1998.
- [6] ČSN EN 206+A1 Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. 2018.
- [7] ČSN EN 1097-6 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. 2014.
- [8] PYTLÍK, P., Recyklace betonu, sborník konference „Speciální betony“, Beroun, únor 2009.
- [9] SEBŮK, T.: Přísady a přídavky do malt a betonů. SNTL, Praha, 133–139, 1985.
- [10] ŠAUMAN, Z.: Úvod do obecné fyzikální chemie a základy fyzikální chemie silikátů, SNTL, Praha, 1965.
- [11] NOVÁK, J. a kol.: Vodou ředitelné epoxidové disperze nové generace, Zpráva o stavu řešení projektu FT-TA3/056, Synpo Pardubice, prosinec 2008.
- [12] RICHARDSON, F., B.: Waterborn epoxy coatings: past, present and future. Modern Paint and Coatings 4(1), 78–84, 1988.
- [13] HOŠEK, J.: Stavební materiály pro rekonstrukce, Vydavatelství ČVUT, leden 1996, ISBN 80-01-01156-9
- [14] OHAMA, Y.: Properties of latex-modified systems. Handbook of polymer-modified concrete and mortars. New York, Notes publications, 132–157, 1995.
- [15] SCHULZE, W.; TISCHER, W.; ETTTEL, W.; LACH, V.: Necementové malty a betony, SNTL, 1990.

SOUČASNÉ MOŽNOSTI OVĚŘENÍ VYPLNĚNÍ KABELOVÝCH KANÁLKŮ S VYUŽITÍM NEJMODERNĚJŠÍCH PŘÍSTROJŮ

CURRENT POSSIBILITIES OF VERIFYING THE FILLING OF CABLE DUCTS BY USING MODERN DEVICES

Jaroslav Šnědar^{*1}, Vojtěch Bartoň¹, Petr Cikrle²

^{*}176535@vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Czech Republic

Abstrakt

Palčivým problémem předpjatých konstrukcí je stav předpínací výztuže, který je úzce spjat s kvalitou její injektáže. Současné poznání v této oblasti diagnostiky je velmi omezené a způsob ověřování spíše zpátečnický. Z tohoto důvodu se autoři rozhodli provést celou řadu testovacích měření, na vytvořených modelech, aby ověřili vhodnost radarů a ultrazvuku k dosažení výsledků.

Za nepříliš přínosné jsou považovány měření pomocí radarů Hilti PS 1000 a GPR Live, jelikož nebyly schopné podat uspokojivé výsledky. Naproti tomu ultrazvuk Pundit 250 Array prokázal svoji opodstatněnost a ukázalo se, že při určité zkušenosti a správné interpretaci výsledků doplněné vhodnou kalibrací přístroje má velký potenciál.

Klíčová slova

Nedestruktivní testování, kabelové kanálky, injektáž, GPR, ultrazvuk

Abstract

A serious problem of post-tensioned constructions is the condition of prestressing reinforcement, which is largely related to the measure of the grouting. Current knowledge in this field of diagnostics is quite limited and the method of verification is rather regressive. For this reason, the authors decided to perform several measurements on the created models, to verify the suitability of radars and ultrasonic to achieve positive results.

Measurements using Hilti PS 1000 and GPR Live radars weren't very beneficial, as they haven't been able to give satisfying results. On the other hand, ultrasonic Pundit 250 Array has proved its value and with some experience and correct interpretation of the results, supplemented by appropriate calibration of the instrument have great potential.

Key words

Non-destructive testing (NDT), cable ducts, grouting, GPR, ultrasonic

1 ÚVOD

Nedestruktivní (NDT) ověření stavu předpínací výztuže je v současnosti jednou z největších výzev v diagnostice předpjatých konstrukcí. Vzhledem k faktu, že stav předpínací výztuže je úzce spjat s mírou zainjektovanosti kabelového kanálku, je nutné při jeho diagnostice věnovat nemalou pozornost právě míře injektáže kanálku. Není-li kanálek správně zainjektován, dojde nevyhnutelně dříve či později ke korozi předpínací výztuže, a tím ke ztrátě nosnosti prvku. Včasným a vhodným ověřením míry zainjektovanosti, ať již v době stavby, či v průběhu životnosti konstrukce, by bylo možné předejít jak velkým finančním ztrátám při následných zbytečně rozsáhlých opravách, tak katastrofickým situacím například v případě pádu mostu jako tomu bylo na Trojské lávce, či na mostě v Janově. V současnosti se reálná diagnostika těchto konstrukcí stále ubírá cestou spíše semi-destruktivního, lokálního ověření stavu kanálků na předem vybraných místech. To má za následek, že se nezíská představa o jejich stavu jako celku. Autoři tohoto výzkumu se však domnívají, že moderní diagnostika 21. století by si měla klást ambicióznější cíle, a to snahu nedestruktivním způsobem ověřit injektáž kabelových kanálků v celé jejich délce. Právě z těchto důvodů je toto téma považováno v dnešní době za vysoce aktuální a je vhodné se jím hlouběji zabývat [1].

Pro ověření teorií, jak výše zmíněné ambice naplnit, byly v laboratořích Fakulty stavební VUT vytvořeny 3 modely jako simulace reálného případu. Na těchto modelech byla následně provedena měření nejmodernějšími diagnostickými přístroji, které se pro řešení tohoto konkrétního problému jeví jako nejvhodnější. Konkrétně se jednalo o radary Hilti PS 1000, GPR Live (8000) a ultrazvuk Pundit 250 Array.

2 METODY VHODNÉ K URČENÍ ZAINJEKTOVANOSTI KABELOVÝCH KANÁLKŮ

Jednotlivé metody byly zvoleny tak, aby mohlo dojít k jejich využití v případě úspěchu i na reálných konstrukcích. Pro otestování zvolených metod byly vytvořeny celkem 3 modely betonových nosníků s různými typy chrániček předpínací výztuže. Jako předloha pro jejich tvorbu byl zvolen nosník KA-61, který však musel být z technologických důvodů upraven. Zásadním rozdílem je použití chrániček SANDRIK o průměr 50 mm namísto původních s průměrem 32 mm. I přes tyto úpravy nedošlo ke změnám jednotlivých poměrů (krytí, rozestupy kabelových kanálků apod.) původního nosníku KA-61.

Každý z modelů je v jedné polovině šířky vyztužen podélnou a smykovou výztuží. Druhá polovina je vyztužena pouze konstrukčně z důvodu ověření vlivu betonářské výztuže.

Model č. 1 byl ponechán bez ochranné trubky kabelových kanálků, u modelu č. 2 tvoří ochranu kabelových kanálků plastové trubky a u modelu č. 3 tenkostěnné ocelové trubky „SANDRIK“.

Kabelové kanálky byly vyplněné vysokopevnostní kotevní a zálivkovou maltou Groutex 603. Každý z kanálků byl vyplněn v jiné míře tak, aby bylo postiženo všechny možné případy.

Radiografie

Radiografie má své opodstatnění ve využití na železobetonových konstrukcích, např. právě pro zjištění zainjektovanosti kabelových kanálků. Jelikož princip této metody spočívá v prozařování vybrané části konstrukce pomocí zářiče a v registraci tohoto záření na rentgenový film na druhé straně.

V minulosti se tímto tématem zabýval např. L. Hobst a spol., přičemž výsledky jejich výzkumu byly prezentovány např. na mezinárodní konferenci v Constantě [8]. Radiografická metoda byla v tomto případě využita taktéž na předpjatých nosnících KA-61 a dosažené výsledky jsou pozoruhodné. S využitím radiografie bylo dosaženo poměrně přesného a jasného zjištění jak míry zainjektovanosti, tak i pozice kabelových kanálků a další výztuže. Navzdory těmto nemalým úspěchům je však využití radiografie v diagnostice staveb v dnešní době na ústupu. Důvody jsou především vysoká cena způsobena zpřísněním pravidel užívání a převozu zářiče. Dále pak obtížnější manipulace s těmito přístroji jako například váha, či nutnost umístění rentgenového filmu na zadní stranu prozařované části konstrukce.

Radar

Georadar, též GPR – Ground Penetrating Radar, je metoda známá desítky let. Původně byla vyvinuta k detekci nejrůznějších objektů v zemním prostředí a hojně se využívá v archeologii, či geotechnice. Až s vývojem nových radarů od společností Hilti nebo Proceq se rozšířila i do oblasti diagnostiky konstrukcí.

Princip radarů spočívá ve vysílání vysokofrekvenčních elektromagnetických impulzů do zkoumaného prostředí a na následné registraci jejich odrazů od nehomogenit v prostředí. Radary takto detekují materiály s různými vlastnostmi, jako je například relativní permitivita či elektromagnetická vodivost. Abychom tedy byli schopni detekovat objekt uvnitř materiálu, musí mít odlišnou relativní permitivitu, či elektromagnetickou vodivost než okolní materiál a zároveň dostatečně velkou odrazovou plochu [4], [2].

Využití radarů se liší podle frekvence vysílací antény. Rozsah frekvencí anténních systémů je od 0,2 GHz do 4,0 GHz. Na použité frekvenci závisí rozlišovací schopnost a hloubkový dosah přístroje. Obecně platí, že s rostoucí frekvencí antény vzrůstají rozlišovací schopnosti, tedy čím kratší bude vlnová délka, tím menší objekty budeme schopni detekovat. Zároveň ovšem klesá hloubkový dosah, jelikož vyšší frekvence jsou více tlumeny prostředím, do kterého pronikají. Pro diagnostiku stavebních konstrukcí jsou tudíž vhodné vysoké frekvence v řádech jednotek GHz [4].

Radar **Hilti PS 1000** byl záměrně vyvinut k diagnostice železobetonových konstrukcí. K detekci výztuže, či jiných materiálů v betonu využívá 3 antény s vysílací frekvencí 1,5 GHz a je schopný detekovat nehomogenity do hloubky až 400 mm. Právě současné snímání třemi anténami umožňuje detekci výztuže a jiných materiálů i ve více vrstvách nad sebou. K detekci pohybu po povrchu využívá 4 kolečka umístěná v každém rohu. Nevýhodou je velmi problematické, často až nemožné, měření na nerovných površích. Dále pak nutnost "rozjezdu" před

začátkem měření cca 10 cm. To znamená, že s tímto přístrojem není možné měřit na plochách, které mění svůj tvar nebo nejsou dostatečně velké [2].

GPR Live (8000) je radar od společnosti Proceq. Na rozdíl od Hilti PS 1000 využívá pouze jednu vysílací anténu, která vysílá kontinuální vlnu s krokovou frekvencí, přičemž rozsah frekvencí se pohybuje v rozmezí 0,2 až 4,0 GHz. Díky této krokové frekvenci je schopný účinně měřit až do hloubky 700 mm. GPR Live má taktéž 4 pojezdová kolečka umožňující detekci pohybu po konstrukci, ty jsou na sobě navíc nezávislá, tudíž i když se pohybuje pouze jedno z nich, tak přístroj pokračuje v měření. GPR Live přenáší bezdrátově naměřená data do tabletu, kde je možné si je zobrazit i ve 3D a dále s nimi pracovat. Nevýhodou je však nutnost pořízení tabletu nebo notebooku od společnosti Apple [5].

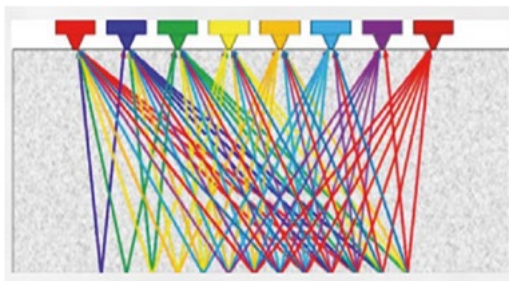
Oba Radary mají vícero možností pořízení skenů konstrukce. Umožňují pořízení jak plošných, tak liniových skenů. Plošné skeny lze zobrazit i ve 3D a získat tím 3D obrázek konstrukce včetně výztuží atp [2].

Tab. 1 Srovnání parametrů radarů Hilti PS 1000 a GPR Live [2], [5].

	Frekvence [GHz]	Hlubkový dosah [mm]	Počet vysílacích antén	Princip
Hilti PS 1000	1,5	400	3	Vlna s frekvencí 1,5 GHz
GPR Live	0,2 - 4,0	700	1	Kontinuální vlna s krokovou frekvencí

Ultrazvuk

Princip ultrazvukového (UZ) tomografu **Pundit 250 Array** je založen na technologii ultrazvukového vícekanálového pulzního echa využívající v základu celkem 8 modulů. Existuje však i větší sonda se 16 moduly. Každý modul obsahuje 3 dry-point-contact (DPC) snímače, přičemž každý DPC funguje jako vysílač i přijímač. Toto společně s technologií Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) umožňuje pořízení obrázků s vysokým rozlišením ve velmi krátkém časovém intervalu (snímková frekvence 5 obrázků za sekundu). V praxi tedy měření probíhá tak, že první modul sondy vyšle signál do zkoumaného prostředí a zbylých 7 signál přijímá. Následně vyšle druhý modul signál a zbylých 6 přijímá (první modul však již signál nepřijímá) atd., až se prostřídají všechny moduly, viz Obr. 1 Výsledný měřicí cyklus se tedy sestává z celkem 28 A-skenů (v případě větší sondy se 16 moduly z 240 A-skenů). Ty jsou následně přepočítány a zobrazeny jako B-skeny v reálném čase za použití technologie SAFT. Parametry ultrazvuku Pundit 250 Array shrnuje Tab. 2 [6], [7].

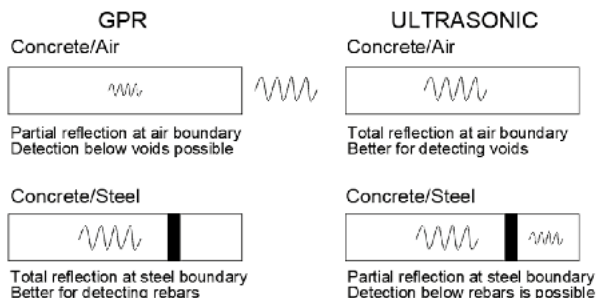


Obr. 1 Měřicí cyklus modulů sondy [6].

Tab. 2 Parametry ultrazvuku Pundit 250 Array [6].

	Rozsah pásma [kHz]	Impulsové napětí UPE [V]	Zisk sondy [dB]	Jmenovitá frekvence snímače [kHz]	Technologie
Pundit 250 Array	35–40	±150	0–80	40	Vícekanálová ultrazvuková pulzní ozvěna

Srovnání principu radaru a ultrazvuku

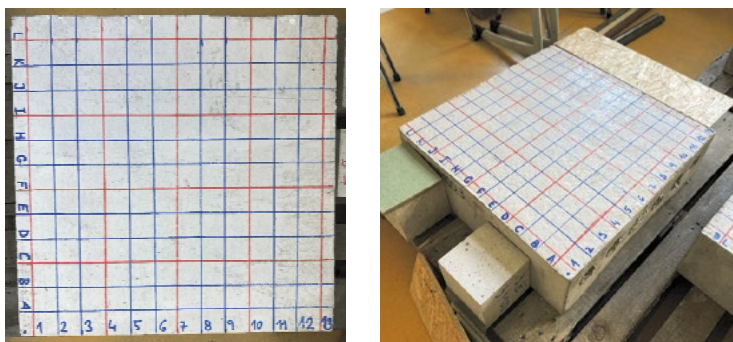


Obr. 2 Srovnání průchodu GPR a Ultrazvukových vln v různých prostředích [5].

Jak je patrné z Obr. 2, každý z přístrojů má jistá omezení, co se týče průchodu jim vysílaných vln různými prostředími. GPR je sice schopný částečně projít vzduchem, plně se však odráží od kovů. Naproti tomu ultrazvukové vlny jsou schopny částečně projít kovy, avšak vzduch či plast jsou pro ně výbornými izolanty. Z tohoto poznání je možné usoudit, že pro měření na výše zmíněných modelech bude nevhodnější ultrazvuk Pundit 250 Array, jelikož dokáže částečně projít kovy a vzduchové mezery v případných nevyplněných kabelových kanálcích pro něj budou velmi dobrým izolantem. Je však otázkou, jak bude fungovat v případě modelu s plastovými chráničkami. Na druhou stranu od radaru GPR lze očekávat velmi přesnou lokalizaci kabelových kanálků.

3 METODIKA MĚŘENÍ

Na každý model byla zakreslena měřicí síť se stejnou orientací a krokem po 5 cm, tak aby bylo možné porovnat získané výsledky z měření. Linie rovnoběžné s osami kanálků v modelu jsou označeny číslicemi 1 až 13. Linie vedené kolmo na osy kanálků jsou značeny písmeny A až L, viz Obr. 3.

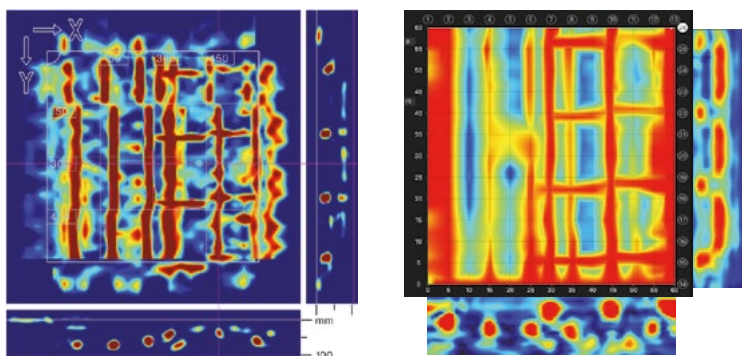


Obr. 3 Měřicí síť na jednom z modelů.

Oba radary byly používány v základním nastavení. Radar Hilti PS 1000 měří v roztečích po 15 cm (červené linie). GPR Live umožňuje měření ve dvou různých roztečích, a to jak po 5 cm, tak 10 cm, proto jsou linie odlišeny barevně (modré a červené). Pro detailnější měření radarem GPR Live byla zvolena rozteč po 5 cm.

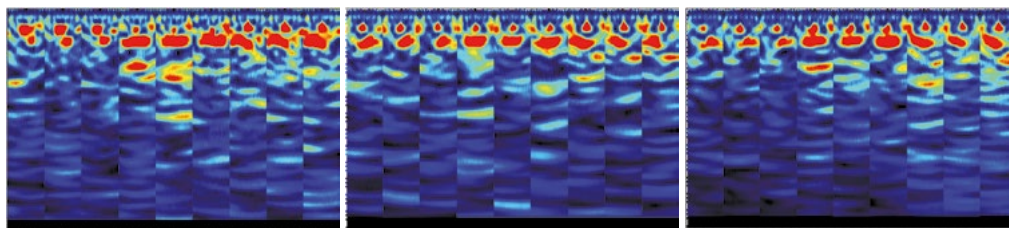
Vhodnost měřicí sítě po 5 cm se uplatnila i v případě měření ultrazvukem Pundit 250 Array. Měření probíhalo v ose x (linie 1-13) i ose y (linie A-L), jen s tím rozdílem, že v ose x bylo nastaveno překrytí skenů hodnotou 0,000 m a v ose y 0,016 m. Ultrazvukem byla první změněna rychlost šíření impulsů v betonu, pro model č.1 činila 2428 m/s, u zbylých modelů č. 2 a č. 3, 2500 m/s. Impulsové napětí bylo nastaveno na 200 V a zisk sondy pro základní měření na hodnotu 45 dB, což se pro danou kvalitu betonu jeví jako nevhodnější nastavení. Zisk sondy lze případně měnit i po skončení měření v programu pro práci s naměřenými daty.

4 VÝSLEDKY



Obr. 4 Vlevo plošný sken modelu č. 3, Hilti PS 1000, vpravo plošný sken modelů č. 3, GPR Live.

Měření pomocí Hilti PS 1000 i GPR Live vykazuje na všech modelech podobné výsledky. Pro další interpretaci výsledků bylo zvoleno jako nejprůkaznější měření na modelu č. 3 viz Obr. 4.



Obr. 5 UZ měření tří různých kanálků na modelech č. 1, 2 a 3.

Měření ultrazvukem Pundit 250 Array byla provedena celá řada. Jako nejnázornější pro náš výzkum byla zvolena měření v osách tří různě vyplněných kanálků na všech 3 modelech viz Obr. 5. Na každém modelu je možno vidět celkem 9 skenů. První 3 skeny zleva jsou na kanálku vyplněném ze 3/4, další 3 na zcela zaplněném a poslední 3 na kanálku prázdném. Hloubky ech ultrazvukových pulsů poté shrnuje Tab. 3.

Tab. 3: Srovnání hloubek ech ultrazvukových pulsů jednotlivých kanálků v závislosti na míře injektáže.

Typ chráničky	Zcela nezainjektovaný	Zainjektovaný ze 3/4	Plně zainjektovaný
Bez	0,070 m	0,090 m	0,104 m
Plastová	0,070 m	0,084 m	0,090 m
Sandrik	0,075 m	0,085 m	0,090 m

5 DISKUZE

Z výsledků získaných radary je patrné, že jsou vhodné k poměrně přesnému zjištění množství, polohy a krytí výztuže i kabelových kanálků. Tyto výsledky byly očekávané a korespondují s výsledky jiných autorů např. [2]. Překvapivým zjištěním je ovšem to, jak měření radarů ovlivnila přítomnost betonářské výztuže. Při detekci kanálku umístěného přímo pod hlavní výztuží, na Obr. 4 druhý zprava, radary nebyly schopné zcela průkazně ověřit polohu kanálku. Radar Hilti PS 1000 jej nedetekoval vůbec, jelikož interpretační software pravděpodobně sjednotil odrazy parabol do jednoho bodu. GPR Live sice v řezu osy y ukázal určitý náznak kanálku, avšak velmi vychýlený z jeho reálné polohy. V řezu osy x vedeném v ose kanálku je vidět zřetelněji, nicméně ve větší hloubce než ve skutečnosti. Autoři výzkumu jsou si vědomi, že se jedná o velmi specifický případ. Prozatím se ale s touto nejasnou funkcí radarů nesesetkali, proto považují za důležité ji zmínit.

Měření ultrazvukem přinesla zajímavější poznatky. Srovnáme-li měření v osách 3 stejných kanálků na stejných částech modelů dostáváme výsledky viz Obr. 5. Z těchto měření lze vidět určité zákonitosti, podle kterých se UZ pulsy šíří v různých prostředích. Potvrdilo se, že toto chování koresponduje s výše popsáním principem metody

UZ. Měření na modelu č. 1, na Obr. 5 vlevo, poměrně jasně ukazuje rozdíly mezi různými kanálky. Částečně zaplněný kanálek má viditelné silné echo z důvodu vzduchové mezery. Zcela zaplněný kanálek má oproti tomu intenzitu echa mnohem menší, téměř splývající s echem zadní stěny modelu. Prázdný kanálek ukazuje silné echo podobně jako u částečně zaplněného, ale v horní části je deformované do tvaru kapky.

U modelu č. 2, na Obr. 5 ve středu, s plastovými chráničkami je možné pozorovat především rozdíl mezi prázdným a zbylými dvěma kanálky. Prázdný kanálek má na rozdíl od zbylých echo výraznější a v horní části protáhlé do tvaru kapky. Mezi zcela zaplněným a částečně vyplněným není, co týče tvaru a intenzity echa, výraznější rozdíl. Jsou zde také vidět rozdíly tvarů, velikostí a intenzit ech v porovnání s modelem č. 1.

Model č. 3, na Obr. 5 vpravo, s kovovými chráničkami se u částečně zaplněné a zcela prázdné chráničky chová podobně jako u modelu č. 2. Překvapivým zjištěním je chování zcela zaplněného kanálku. Dle dříve popsaných principů UZ by bylo na místě očekávat, že intenzita echa kanálku bude nižší a méně zřetelná než u prázdného. Opak je však pravdou a tento jev se nepodařilo zcela objasnit a bude třeba se jím dále zabývat. Jednou z možných příčin může být způsob šíření UZ pulsů. Zatímco u prázdného kanálku se pulsy částečně odrazí od vrchní části kovové chráničky a následně zcela odrazí od vzduchové kapsy v chráničce, tak v případě zaplněného kanálku dojde k jednomu odrazu na horní straně chráničky, projdou injektážní maltou a odrazí se i od zadní stěny. Tato interference UZ impulsů by tedy mohla mít za následek odlišné chování plného kanálku s kovovou chráničkou.

Dalším pozorovaným trendem jsou posuny hloubky ech v závislosti na typu chráničky a míře zainjektování. Dá se konstatovat, že čím větší míra injektáže, tím větší oddálení echa kanálku od povrchu. Při změně typu chráničky nejsou tyto změny tak signifikantní. Za průkazné se dají považovat rozdíly mezi modelem bez chrániček a modely s chráničkami, kdy se echa kanálků bez chrániček vzdalují od povrchu více, konkrétní hodnoty viz Tab. 3. Mezi modely s plastovými a kovovými chráničkami jsou rozdíly minimálně a lze je rozeznat spíše podle tvaru echa.

Při srovnání s pracemi jiných autorů věnujících se tomuto tématu lze, i přesto, že byl použit jiný UZ s odlišnými parametry, tyto výsledky srovnat např. s měřeními M. Krause a spol. v [3]. Za zásadní jsou autory tohoto výzkumu považovány relativní výstupy, jelikož měření UZ závisí na mnoha faktorech a je nutné jej vždy kalibrovat pro daný případ. V těchto relativních výstupech jako např. různá hloubka ech UZ pulsů v závislosti na typu chráničky a množství injektáže, či tvar echa (intenzita reflexí) od různých materiálů se oba výzkumy v zásadě shodují.

6 ZÁVĚR

Z výše interpretovaných výsledků je patrné, že pro zjištění míry zainjektovanosti kabelových kanálků bude zřejmě nejvhodnější metoda ultrazvukového pulzního echa, např. při použití přístroje Pundit 250 Array. Na rozdíl od radarů Hilti PS 1000 a Proceq GPR Live, které neměly téměř žádný úspěch, je totiž schopný určit rozdíly mezi mírou zainjektovanosti a s určitou zkušeností i rozpoznat, zda má kanálek chráničku, či nikoliv. Je však nutné si uvědomit, že UZ nám ukazuje obraz složený z jednotlivých odrazů pulzního echa od všech rozhraní, včetně násobných odrazů, takže výsledky se mohou případ od případu lišit a nemusí být na první pohled zřejmé, zda je kanálek vyplněný injektáží či nikoliv. V každém případě však přístroj zaznamená relativně výrazné rozdíly mezi částí kanálku vyplněnou a nevyplněnou. Pokud jsme schopni si UZ na vybraných místech nakalibrovat (např. ověřením vrtanou sondou ke kanálku), umožní nám to poměrně přesné a rychlé ověření v celé jeho délce.

Použité zdroje

- [1] O. Anton, P. Cíkrle, and V. Heřmánková. Current possibilities of the diagnosis of prestressing steel in structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 549:012016, jun 2019.
- [2] O. Anton, T. Komárková, and V. Heřmánková. An optimal method of determining the position of bends on shear reinforcement as part of the diagnosis of reinforced concrete beam structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 549:012015, jun 2019.
- [3] M. Krause, B. Milmann, BAM, Berlin, Martin Germany, Mřpa Schickert, Weimar Bauhausuniversität, Klaus Germany, and Mayer. Investigation of tendon ducts by means of ultrasonic echo methods: A comparative study. 2006.
- [4] O. Anton, P. Cíkrle. Vývoj nedestruktivních metod pro zkoušení betonu od roku 1990. *BETON TKS*, 2015.
- [5] Proceq. Proceq GPR live. <https://www.proceq.com/product/proceq-gpr-live>
- [6] Proceq. Pundit 250 Array. <https://www.proceq.com/product/pundit-250-array/>
- [7] Vonk, Sarah and Taffe, Alexander. Detection of near-surface reinforcement in concrete components with ultrasound. *MATEC Web Conf.*, 199:06007, 2018.
- [8] L. Hobst, V. Mencl. Radiography of Prestressed Concrete Structures. *COMPORTAREA IN SITU A CONSTRUCTIILOR, Constanta, 1986*.

POUŽITÍ ULTRAZVUKOVÉ METODY PRO ODHALENÍ VNITŘNÍCH VAD V ŽELEZOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍCH

APPLICATION OF ULTRASONIC PULSE METHOD FOR DETECTION OF INTERNAL DEFECTS IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Sabina Hübllová^{*1}, Kristýna Hrabová¹

^{*}157411@vutbr.cz

¹ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

V posledních letech roste zájem o obnovu a rekonstrukce historických staveb. V některých prvcích může docházet k tvorbě trhlin, které je potřeba odhalit především z důvodu zachování bezpečnosti konstrukcí. Jako vhodné se zdá použít nedestruktivní metody, jako je třeba metoda ultrazvuková využívaná v praxi nejen pro zjištění pevnosti v tlaku, ale také pro odhalení vnitřních vad ve struktuře betonu. V České republice ale i ve světě je problematice vyšetřování vnitřních poruch v železobetonových konstrukcích pomocí ultrazvukové metody věnována poměrně malá pozornost. Proto bude tento článek zaměřen právě na příklady z praxe a bude vysvětlen způsob použití a princip fungování této metody především při defektoskopii vnitřních vad v železobetonových konstrukcích.

Klíčová slova

Nedestruktivní testování železobetonových konstrukcí, ultrazvuková impulsová metoda, pevnost betonu v tlaku, vady a poruchy v betonu

Abstract

In recent years, there has been a growing interest in the reconstruction of historic buildings. In some elements, cracks may form, which need to be detected primarily to maintain the safety of structures. It seems appropriate to use non-destructive methods - ultrasonic method, which is used in practice not only to determine the compressive strength, but also to detect internal defects in the structure. In the Czech republic but also in the world, relatively little attention is paid to the issue of investigating internal failures in reinforced concrete structures using the ultrasonic method. This article will focus on practical examples and will explain the method and its principles especially in the defectoscopy of internal defects in reinforced concrete structures.

Key words

Non-destructive testing of the reinforced structures, ultrasonic pulse velocity, compressive strength of concrete, defects and faults in concrete

1 ÚVOD

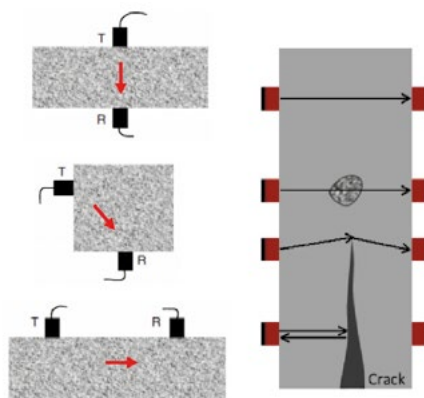
Diagnostika stavebních konstrukcí zkoumá konstrukce z důvodů bezpečnosti a trvanlivosti za pomoci vizuálních prohlídek nebo destruktivních či nedestruktivních zkoušek. Právě bezpečnost je nejdůležitějším faktorem při hodnocení schopnosti konstrukce. Nedestruktivní zkoušky získaly na své oblibě především proto, že nepoškozují zkoumanou konstrukci a nezhoršují její funkci. Jedním z řešení je použití ultrazvukové impulsové metody, která bývá u nově vybudovaných staveb využita zejména kvůli kontrole kvality materiálů, zatímco v případě starších budov slouží zejména k hodnocení jejich stavu v rámci bezpečného užívání, jako je popsáno v normě ČSN 1371 [1]. V současnosti se na našem území (a také všude ve světě) nachází mnoho staveb historického charakteru. U těchto staveb je často nemožné zasahovat do jejich vnitřní struktury vzhledem k jejich historickému významu. Norma ČSN ISO 13 822 [2] uvádí mezinárodně platné postupy hodnocení spolehlivosti existujících konstrukcí. V případě hodnocení existujících konstrukcí a návrhu konstrukčních opatření se dle této normy požadavky na bezpečnost či použitelnost v podstatě shodují s navrhováním konstrukcí nových. Ovšem i tak mezi nimi existují značné rozdíly, a proto se u většiny existujících

konstrukcí uplatňuje minimum stavebních zásahů do konstrukcí. Cíl prodloužit životnost těchto staveb se v posledních letech stává fenoménem z hlediska environmentálních, ekonomických a dalších výhod, mezi které patří - snížení emisí, snížení množství použitého materiálu či úspory energie, jako je podrobně popsáno v článku [3]. Proto se zvyšujícím se počtem těchto staveb roste i poptávka po nedestruktivním testování. Jedním z problémů při zajišťování bezpečnosti staveb je správně odhalit místa, kde konkrétně došlo k oslabení stavební konstrukce či prvku. Stále se ultrazvuková metoda používá především ke zjišťování pevnosti betonu v tlaku, avšak dnes je tato metoda vhodná také pro detekci interních vad v betonových konstrukcích. Těto problematice je věnována pozornost jen zřídka. V mnoha případech jsou trhliny vyskytující se na povrchu konstrukce pouze estetickou záležitostí, naopak trhliny vyskytující se uvnitř betonu by mohly způsobit vážné problémy související s únosností a bezpečností konstrukce. Díky grafickému vyhodnocení výsledků, které moderní přístroje vyskytující se na trhu nabízí, je velice jednoduché a rychlé nalézt právě místa s nižší rychlostí ultrazvukových vlnění. Tato místa mohou poukazovat právě na oblasti, kde mohlo dojít ke vzniku trhlin, kde mohly nastat problémy související se špatným uložením betonu nebo v těchto místech mohl být beton špatně zhutněn v průběhu výstavby. Tato metoda může velice ušetřit čas i náklady, protože nezpůsobí žádné škody ve srovnání s metodami destruktivními [4].

Tento příspěvek bude zaměřen na porovnání literatury a odborných článků, které věnují pozornost právě použití ultrazvukové metody ve spojitosti s hledáním vad a poruch ve vnitřní struktuře betonu. Výsledky získané z různých částí světa budou porovnány a měly by v budoucnu sloužit jako podklad pro ověření využitelnosti a spolehlivosti této metody při detekci interních poruch či jiných nedokonalostí v železobetonových konstrukcích, ke kterým mohlo dojít z různých důvodů.

2 METODIKA

Nedestruktivní metody používané v diagnostice železobetonových konstrukcí jsou právě ty, které nezpůsobí poškození konstrukce nebo prvku a také které zanechají jen minimální stopy, jenž lze snadno opravit. Jak už bylo mnohokrát zmíněno, jednou z nejpoužívanějších metod je právě ultrazvuková impulsová metoda, která funguje na principu opakovaného vysílání ultrazvukových vln do povrchu konstrukce budičem. Na konci samotného prvku dojde k sledování prošlých impulsů přijímačem. Metoda je nejlépe využitelná u konstrukčních prvků přístupných z obou stran - tedy sloupy, pilíře nebo nosníky. Mohou být použity tři různé typy prozvučování - přímé, nepřímé a polopřímé, jako je uvedeno na Obr. 1 [5]. Při použití ultrazvukové metody je nutné vybrat vhodný typ prozvučování a je také potřeba vhodně zvolit frekvenci použitých sond, kde na hranici vzduch-materiál je nutno zvolit vhodný akustický prostředek (doporučuje se, aby vrstva spojovacího materiálu byla co nejtenčí). Při měření je vždy známa dráha (odpovídající rozměrům konstrukce) a je naměřen čas, za který projde ultrazvuková vlna měřeným prvkem. Pokud jsou měřicí sondy umístěny přímo naproti sobě na opačných stranách (tzv. přímé prozvučování), je právě rozměr prvku nejkratší vzdáleností, kterou ultrazvuková vlna projde. Přímé prozvučování je také považováno za nejpřesnější. Z těchto charakteristik (dráha prvku a čas) je tedy možné vypočítat odpovídající rychlost. Tato rychlost určuje kvalitu materiálu. Čím větší naměřená rychlost je, tím vyšší je kvalita materiálu. Jestliže se na trase vlny nachází jakákoli mezera nebo dutina, dojde k prodloužení dráhy a tedy ke zpomalení rychlosti. Naopak výztuž nacházející se v konstrukci může zvýšit rychlost, jelikož pohyb vln je v kovových prvcích vyšší. Proto je interpretace výsledků u silně vyztužených prvků poněkud obtížná. V případě betonu se jedná o beton nízké kvality, pokud je vypočtená rychlost menší než 3000 m.s^{-1} , naopak vysokou kvalitu betonu značí beton s rychlostí okolo 4500 m.s^{-1} [1]. Mezi nejmodernější přístroje, které jsou v současnosti na trhu, patří přístroj Pundit PL 200-PE s paměťovým osciloskopem, který se ukázal jako účinný nástroj pro kontrolu kvality betonu. Jeho použití může být velice jednoduché, rychlé a přesné pokud je přístroj použit kvalifikovanými osobami s dostatečným množstvím teoretických znalostí a v případě, jsou-li dodrženy zásady, které výrobce (v tomto případě švýcarská firma Proceq) uvádí [6].



Obr. 1 Možnosti prozvučování konstrukcí dle typu umístění sond - přímé, polopřímé a nepřímé.

3 DETEKOVÁNÍ VNITŘNÍCH PORUCH S VYUŽITÍM ULTRAZVUKOVÉ IMPULSOVÉ METODY VE SVĚTĚ I U NÁS

Ultrazvuková impulsová metoda je používána v různých oblastech stavebnictví. Jedná se o celosvětově zaužívanou metodu pro defektoskopii železobetonových konstrukcí. Svoji oblibu si zasloužila především kvůli jejímu nedestruktivnímu charakteru, snadné obsluze přístroje nebo možnosti opakovaného použití.

V článku "Experimental Evaluation of Cracks in Concrete by Ultrasonic Pulse Velocity" byla ultrazvuková impulsová metoda použita pro zjištění, jakou mírou vznik trhlin ve vnitřní struktuře betonu ovlivňuje rychlost ultrazvukových vln. Experiment byl proveden na třech betonových krychlích s rozměry $150 \times 150 \times 150$ mm. Zde byly objektem zkoumání 3 betonové krychle s pevností 25 MPa. První krychle byla podrobena zkoušce pevnosti v tlaku a byla zatížena na 45% své konečné pevnosti. Druhá krychle byla zatížena na 65% své maximální pevnosti (kdy došlo k rozvoji mikrotrhlin) a třetí krychle sloužila jako referenční. První dvě krychle byly zatěžovány, aby se ve vnitřní struktuře betonu vytvořily trhliny. V případě porušené krychle č. 2, kde vznikly větší trhliny, došlo i k markantnímu snížení modulu pružnosti, zatímco mikrotrhliny v krychli č. 1 téměř neovlivnily dráhu ultrazvukových vlnění [7].

Cílem studie "Crack depth measurement of reinforced concrete beams using UPV" bylo určení hloubky trhlin za pomoci ultrazvukové impulsová metody na železobetonových nosnicích s krycí vrstvou 2, 3, 4 a 5 cm. Naopak jeden z nosníků vyztužen nebyl. U jednotlivých nosníků byly uměle vytvořené praskliny a umělou přepážku uvnitř nosníků tvořily zinkové desky v předem zadané poloze [8].

Naopak v příspěvku s názvem "Analysis of reinforced concrete structures through the ultrasonic pulse velocity: technological parameters involved" je zkoumán vliv technologických proměnných na kvalitu betonu za pomoci ultrazvukové impulsová metody. Na brazilské univerzitě Rio Grande do Sul byla tato metoda využita v případě dvou vytvořených zdí s rozměry téměř odpovídajícími realitě (jedna zeď byla vyztužena a druhá bez vyztužení). Do těchto zdí byly vloženy předměty simulující vnitřní poruchy v betonu. V tomto článku ultrazvuková metoda potvrdila, že v případě je-li měření správně provedeno, může metoda nabízet snadnou implementaci výsledků a rychlou a vhodnou schopnost detekovat poruchy. Tato práce byla navržena s cílem zmírnit existující pochybnosti o využití ultrazvukové metody v terénních podmínkách a usilovala o zmírnění problémů týkajících se technologických procesů [9].

Příspěvek "Concrete Defects Sizing by Means of Ultrasonic Velocity Maps" ilustruje výsledky experimentálních zkoušek provedených na italské univerzitě v Cagliari, jejichž cílem bylo zkontrolovat účinnost ultrazvukové impulsová metody při zjišťování vnitřních anomálií (dutiny, plastové prvky) menší betonové stěny, na které byly nasimulovány typické chyby v betonu. Betonová zeď měla rozměry $0,90 \times 0,62 \times 0,38$ m. Během odlévání byla do zdi vložena prázdná krabice s polystyrenem o velikosti $0,20 \times 0,38 \times 0,14$ m považovaná za makro-dutinu; dále tři plastové disky o průměru 0,075 m a tloušťce 0,003 m usazené blízko povrchu v různých hloubkách, kde byl předpoklad, že se jedná o malé podpovrchové vady. K měření ultrazvukem byl vytvořen speciální rastr a zeď byla prozvučována přímo. Pro každou vlnovou dráhu (odpovídající tloušťce zdi) byla vypočtena rychlost ultrazvukového signálu. Zjištění, že defekty nacházející se v betonu zpomalují rychlosti

ultrazvukových vlnění, ukázal i tento článek. V tomto případě byly pro identifikaci oslabených míst s vytvořenými vadami nápomocné rastry, které byly použity za účelem shromáždění komplexních informací o vnitřním prostoru prvku [3].

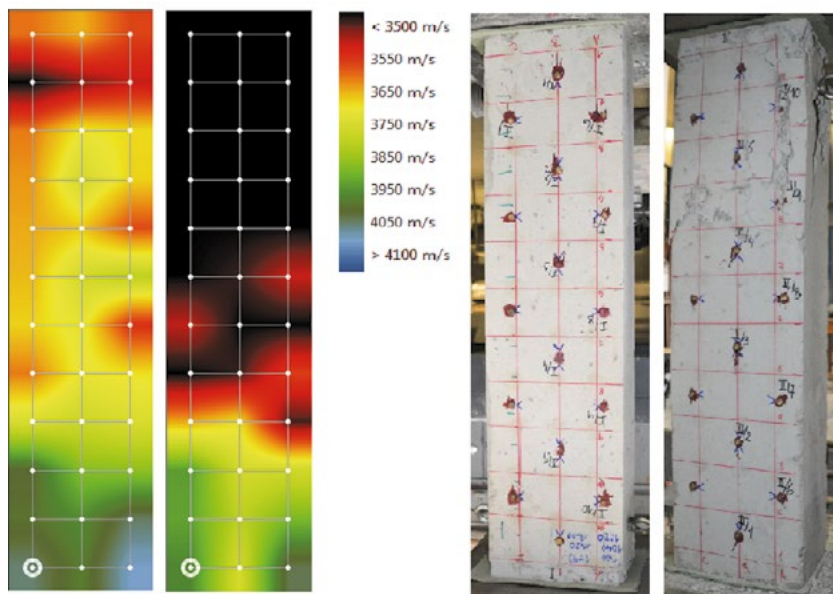
Ultrazvuková impulsová metoda byla použita také v příspěvku "Assessing the performance of concrete structure based on the width of the crack using UPV", kde objektem zkoumání byly terasové domy s rozšířenými prasklinami. Cílem bylo zjistit stav aktuální betonové konstrukce a identifikovat kritické liniové trhliny. V tomto případě byla rychlost ultrazvukových vlnění méně než $3000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a tedy kvalita betonu vycházela příliš nízká. V první fázi byla provedena kontrola vizuální a ve druhé fázi byly identifikovány všechny liniové trhliny [10].

Detekce vnitřních poruch v průběhu cyklického zatěžování železobetonového sloupu

Většina článků se věnuje detekování trhlin v již porušeném betonu, avšak námi provedený experiment byl uskutečněn na železobetonovém sloupu s rozměry $300 \times 200 \times 1200 \text{ mm}$, kdy byl beton zkoumán ultrazvukovou impulsovou metodou před i v průběhu cyklického zatěžování. Trhliny se v konstrukci postupně tvořily v závislosti na vzrůstajícím napětí (obdobně jako v článku [7]). Sloup byl také vyhotoven s uměle vytvořenými vadami (v tomto případě se jednalo o horší kvalitu betonu) a očekávalo se, že již před zatěžováním bude ultrazvuk v těchto místech ukazovat nižší hodnoty naměřených rychlostí, než v místech, kde se žádné vady nenacházely. Beton horší kvality se nacházel u horní hlavy sloupu a asi 750 a 500 mm od spodního okraje sloupu. Při defektoskopii byl použit přístroj Pundit PL-200 PE a měření bylo provedeno na kratší ze základů. Pomocí přístroje Profometer MP-600/PM-630 byla lokalizována výztuž, aby mohl být na sloupu vytvořen pomocný měřicí rastr.

4 VÝSLEDKY

V experimentu, který byl proveden na železobetonových sloupech, bylo ultrazvukové měření provedeno hned několikrát. Nejprve před začátkem cyklického zatěžování sloupu, kde bylo z naměřených rychlostí patrné, kde se nachází námi vytvořené vady (místa s nižší rychlostí ultrazvukových vlnění). Při postupném zatěžování docházelo k rozvoji trhlin především v místech hlavy sloupu, kde se lokálně nacházel beton nižší kvality - viz Obr. 2. Trhliny se začaly tvořit asi okolo 17. cyklu a k úplnému porušení došlo při 26. cyklu a ve sloupu bylo dosaženo napětí asi 17,33 MPa.



Obr. 2 Porovnání výsledků ultrazvukových měření před začátkem zatěžování sloupu a na konci 26. zatěžovacího cyklu.

5 ZÁVĚR

I přes to, že se většina světové literatury věnuje použití ultrazvukové metody především pro zjištění pevnosti v tlaku, lze podotknout, že již dnes se začíná dostávat pozornosti i problematice detekování vnitřních vad a poruch. Cílem článku bylo interpretovat výsledky i z různých částí světa a porovnat je s námi provedeným experimentem. Ve většině případů ultrazvuková metoda ukázala, že její použití pro identifikaci vnitřních vad a dalších nesrovnalostí uvnitř betonových konstrukcí bylo velice přesné. Zpravidla byly v místech, kde došlo k vytvoření umělých vad nebo kde vznikly trhliny v průběhu zatěžování, naměřeny menší hodnoty ultrazvukových rychlostí, které naznačovaly nižší kvalitu materiálu. Velice nápomocné bylo také zvolení rastrových map, které usnadnily lokalizaci defektů. Použitý přístroj Pundit PL-200 PE lze tedy spolehlivě použít k účelu stanovení interních poruch v konstrukcích, avšak je nutná správná manipulace s přístrojem, a je zapotřebí teoretických znalostí, aby nedošlo ke špatné interpretaci výsledků.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za finanční podpory specifického výzkumu Defektoskopie poruch železobetonových konstrukcí s využitím ultrazvukové metody č. FAST-J-20-6425 Vysokého učení technického v Brně.

Použité zdroje

- [1] Norma: ČSN 73 1371 Nedestruktivní zkoušení betonu - ultrazvuková impulsová metoda zkoušení betonu. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [2] Norma: ČSN ISO 13 822 Zásady navrhování konstrukcí - Hodnocení existujících konstrukcí. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [3] G. Cuncu and N. Trulli, Concrete Defects Sizing by Means of Ultrasonic Velocity Maps. Building 2018, 8, 176.
- [4] P. Cikrle, Význam nedestruktivních diagnostických metod pro hodnocení železobetonových konstrukcí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2017. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. Habilitační a inaugurační spisy ISBN 978-80-214-5464-4. <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/978-80-214-5464-4.pdf>
- [5] FPrimeC Solutions, Ultrasonic Testing of concrete. Available from: <https://www.fprimec.com/ultrasonic-testing-of-concrete/>
- [6] Proceq: PUNDIT® PL-200 ULTRASONIC PULSE VELOCITY. Switzerland, 2014 https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Pundit%20PL-2_Sales%20Flyer_English_high.pdf
- [7] T.S. Kalyan and J. C. Kishen, Experimental Evaluation of Cracks in Concrete by Ultrasonic Pulse Velocity. 2016.
- [8] A. Wibowo et al. Crack Depth Measurement of Reinforced Concrete Beams Using UPV. *Rekayasa Sipil*, [S.l.], v. 8, n. 1, p. pp.41-46, oct. 2014. ISSN 2502-6348.1983-4195 Brazílie
- [9] D.S. Adamati, A. Lorenzi, J.A. Chies, L.C.P. Silva Filho, Analysis of reinforced concrete structures through the ultrasonic pulse velocity: technological parameters involved. Volume 10, Number 2 (April 2017), p. 358-385. ISSN 1983 - 4195. Available from: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952017000200006>.
- [10] M.A. Habullah, R. Yusof and M.N. Yusoff. Assessing the performance of concrete structure based on the width of the crack using UPV. *Journal of Engineering Science and Technology* Volume 12, Special Issue, ISSC'16, April 2017.

ZACÍLENÁ RENTGENOVÁ TOMOGRAFIE S VYSOKÝM ROZLIŠENÍM

HIGH RESOLUTION REGION OF INTEREST X-RAY TOMOGRAPHY

Ivana Kumpová*^{1,2}, Michal Vopálenský²

*ivana.kumpova@vutbr.cz

¹Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno

²Ústav teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd České republiky, v. v. i., Prosecká 809/76, 190 00 Praha 9

Abstrakt

Metoda rentgenové mikro-tomografie je stále více využívána mimo jiné při výzkumu materiálových charakteristik a lomového chování stavebních materiálů. Poskytuje slibné výsledky v oblasti trojrozměrného pozorování a kvantifikace prvků mikrostruktury, včetně objektů lomu. Se standardním přístupem k získávání tomografických dat je však dosažitelné rozlišení výrazně omezeno velikostí zkoumaného objektu, což má za následek omezení nebo dokonce úplnou ztrátu užitečných informací týkajících se například tvaru a velikosti lomové procesní zóny. Z tohoto důvodu byly v této práci testovány možnosti tomografického cílení na zájmovou oblast s vyšším dosažitelným rozlišením, než je obvyklý limit tomografických systémů.

Klíčová slova

RTG mikro-tomografie, prostorové rozlišení, poměr kontrastu k šumu, redukce šumu, mapování 3D objemu

Abstract

The method of X-ray micro-tomography is increasingly used in the research of material characteristics and fracture behavior of building materials. It brings promising results in the field of three-dimensional observation and quantification of microstructure elements, including fracture objects. However, with the standard approach to the tomographic data acquisition, the achievable resolution is severely limited by the size of the examined object resulting in a reduction or even complete loss of useful information regarding, for example, the shape and size of the fracture process zone. For this reason, the possibilities of tomographic targeting of the region of interest with a higher achievable resolution than the usual limit of the tomographic systems have been tested in this work.

Key words

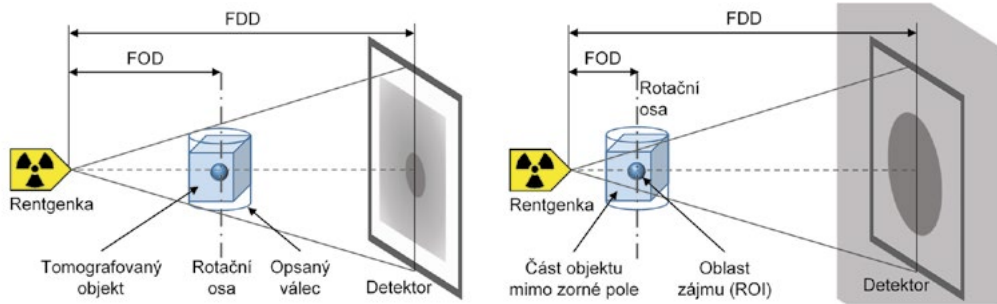
X-Ray micro-tomography, spatial resolution, contrast to noise ratio, denoising filtering, 3D volume fitting

1 ÚVOD

Při výzkumu materiálových charakteristik i lomového chování kvazikřehkých stavebních materiálů je stále častěji využívána metoda rentgenové (RTG) mikro-tomografie. Metoda přináší slibné výsledky v oblasti trojrozměrného pozorování a kvantifikace prvků mikrostruktury, včetně objektů lomu [1], [2], [3]. Při standardním vyhodnocování tomografických dat je však dosažitelné zvětšení / rozlišení značně limitováno velikostí vyšetřovaného tělesa. Tím může být omezena nebo i zcela ztracena užitečná informace týkající se např. tvaru a velikosti lomové procesní zóny, mezifázové přechodové vrstvy, porů na mikrometrické úrovni atp. Z tohoto důvodu byly testovány možnosti tomografického zacílení oblasti zájmu s vyšším dosažitelným rozlišením, než je běžný limit tomografu.

Výpočetní tomografie („*computed tomography*“, CT) je nedestruktivní metoda všeobecně známá z lékařského prostředí. Medicínské CT skenery mají fixní ozařovací geometrii, s přibližně dvojnásobným zvětšením, kde rotuje soustava rentgenka–detektor okolo těla pacienta, který je posunován v ose rotace. Typické rozlišení těchto CT skenerů je okolo 1 mm na prostorový bod (voxel), nejnovější generace dosahují rozlišení v desetinách mm. U medicínských CT skenerů je obvykle urychlovací napětí nastavitelné v rozmezí 80–120 kV, čímž je generováno RTG záření s maximální energií 80–120 keV. Technické tomografy jsou zpravidla koncipovány tak, že rotuje objekt a zdroj rentgenového záření i detektor jsou při měření statické. Zvětšení je nastavitelné v širokém rozsahu polohou rotační osy mezi zdrojem záření a detektorem. Také urychlovací napětí na rentgence, a tím i energii (vlnovou délku) vyzařovaných fotonů, lze měnit v rozsahu větším, než je obvyklé u medicínských skenerů [4].

Během tomografie vykoná objekt jednu úplnou otáčku, při níž jsou na detektor zachycovány stovky až tisíce tzv. projekcí (2D rentgenové snímky, rentgenogramy). Po skenování je tedy k dispozici sada RTG snímků objektu z různých úhlů. Z těchto snímků lze vypočítat prostorový model objektu včetně jeho vnitřních struktur [4]. Tento proces, tzv. rekonstrukce, probíhá postupně výpočtem jednotlivých řezů objektem kolmých na rotační osu. Rentgenogramy jsou před vstupem do výpočtu korigovány, aby byl odstraněn vliv nestejnorodé odezvy detektoru v různých pixelech a další nežádoucí jevy. Pro korekce je třeba nabrat dostatečný počet korekčních obrázků; pro jednoduchou korekci („flat field correction“, FFC) jsou to obrázky bez objektu a obrázky bez ozáření.



Obr. 1 Geometrie tomografické sestavy během standardní (vlevo) a ROI tomografie (vpravo).

Při standardní tomografii je získávání dat (projekcí) prováděno při geometrickém seřízení tomografické sestavy zajišťujícím, aby byl na detektoru snímán obraz celé šířky zkoumaného objektu v průběhu jeho rotace, přičemž normála k rovině detektoru prochází ohniskem rentgenky, osou rotace zkoumaného objektu a středem detektoru ve svislém i vodorovném směru (viz Obr. 1 vlevo). Většina současných laboratorních rentgenových zdrojů emituje kuželovitě se rozvíjející svazek RTG záření. Šířka stínu vyšetřovaného objektu na detektoru je pak přibližně

$$w_{\text{proj}} \approx \frac{FDD}{FOD} \cdot w_{\text{smp}} \quad (1)$$

kde w_{proj} je šířka projekce objektu na detektor;
 FDD je vzdálenost mezi ohniskem rentgenky a středem detektoru („focus–detector distance“);
 FOD je vzdálenost mezi ohniskem rentgenky a osou otáčení vzorku („focus–object distance“);
 w_{smp} je průměr opsaného válce ohraničujícího vyšetřovaný objekt.

S požadavkem, aby během tomografie dopadaly všechny projekce objektu v celé své šířce na detektor, může být maximální velikost w_{proj} rovna šířce detektoru w_{det} . Na základě (1) je maximální dosažitelné zvětšení M_{max}

$$M_{\text{max}} = \frac{FDD}{FOD} < \frac{w_{\text{det}}}{w_{\text{smp}}} \quad (2)$$

Nativní rozlišení výsledného virtuálního modelu je dáno velikostí v_{xs} jeho objemového obrazového bodu (voxel), obvykle udávanou v mikrometrech. Tato hodnota je určena geometrií tomografického měření (zvětšením) a konstrukční velikostí pixelu detektoru p_{xs} . Čím větší je zvětšení, tím menší je velikost voxelu a tím lepší je rozlišení. Za podmínky takto stanoveného maximálního pokrytí detektoru je zvětšení omezeno a minimální velikost voxelů je dána jako (3), přičemž N_{det} udává počet pixelů v jednom řádku detektoru.

$$v_{\text{xs}} = \frac{p_{\text{xs}}}{M_{\text{max}}} = \frac{p_{\text{xs}} \cdot FOD}{FDD} > p_{\text{xs}} \frac{w_{\text{smp}}}{w_{\text{det}}} = \frac{w_{\text{smp}}}{N_{\text{det}}}, N_{\text{det}} = \frac{w_{\text{det}}}{p_{\text{xs}}} \quad (3)$$

Z (3) je zřejmé, že velikost projekce objektu dopadající na detektor podstatně omezuje dosažitelné rozlišení výsledného modelu. Zejména při výzkumu stavebních materiálů s využitím rentgenové mikro-tomografie však může být rozlišení dosahované v popsaném standardním tomografickém nastavení nedostatečné. Přitom je vyloučeno použití menších vzorků s ohledem na potřeby zachování vypovídajícího objemu či provedení kvazi-statických lomových experimentů. Z tohoto důvodu byly testovány možnosti tomografického zacílení oblasti zájmu s vyšším dosažitelným rozlišením, než je běžný limit tomografu za nedodržení limitní podmínky dané (2) resp. (3), kdy bylo zorné pole zaměřeno pouze na vybranou část zkoumaného objektu (viz Obr. 1 vpravo), čímž byla realizována tzv. ROI tomografie („region of interest“, ROI). Z hlediska výše diskutovaných rovnic se jedná o situaci, kdy je zvětšení nastaveno na vyšší hodnotu než M_{max} z (2) a projekce objektu se nevejde na detektor. Při tomto přístupu se na detektor vždy promítá pouze část objektu v blízkosti osy otáčení, zatímco zbývající části objektu přicházejí do zorného pole pouze v určitých úhlech, kde ovlivňují intenzitu v jednotlivých projekcích a jednotlivých pixelech. Tato skutečnost vede k artefaktům při rekonstrukci a ovlivňuje obrazový šum. Cílem

popsaného experimentu je zdokumentovat proces ROI tomografie, porovnat jej se standardním přístupem a dokázat její proveditelnost při rutinních měřeních.

2 METODIKA

Popis zkoumaného objektu

Pro test možností rekonstrukce z dat získaných zacílením pouze na část vyšetřovaného objektu bylo použito zrno kameniva o rozměrech cca $25 \times 20 \times 15$ mm z horniny složené ze dvou dobře rozpoznatelných minerálů, připevněné k ocelovému nosiči vzorků. Po tomografii celého zrna byla vzdálenost *FOD* změněna tak, aby bylo získáno přibližně $3\times$ větší zvětšení / rozlišení, zatímco střední část vzorku zůstala v ose otáčení. Za použití této geometrie byly všechny získané projekce ovlivněny částmi kamene mimo ROI, které se objevují a mizí v / ze zorného pole v závislosti na konkrétním úhlu.

Instrumentace

Pro získání tomografických dat bylo využito pokročilého tomografického zařízení TORATOM v Centru Telč Ústavu teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd České republiky. Rekonstrukce a vizualizace výsledků byly následně provedeny v komerčním software VG Studio Max verze 3.4 (Volume Graphics GmbH, Německo).

Tomograf TORATOM (Twinned Orthogonal Adjustable Tomograph) kombinuje dvě rentgenky se dvěma detektory ve vzájemně kolmém uspořádání a sdílenou velmi přesnou rotační platformu s vertikální osou rotace. Toto uspořádání umožňuje vysoce specializované metody sběru dat při specifických tomografických úlohách. Stroj má motorizované osy pro nastavování vzdáleností rentgenka–vzorek–detektor, zvětšení je možné volbou uspořádání nastavit zhruba od $1,2\times$ až po $100\times$. Při dané velikosti pixelů používaných detektorů je možné měnit rozlišení CT rekonstrukcí od 200 mikrometrů po jednotky mikrometrů na prostorový bod. Celá sestava je namontována na pevném stole s aktivním tlumením mechanických otřesů, což dále přispívá ke stabilitě a spolehlivé funkci stroje i při velkých zvětšeních. Pracoviště je v oblasti mikro-tomografie jedinečné v mezinárodním měřítku, zařízení je chráněno evropským patentem [5].

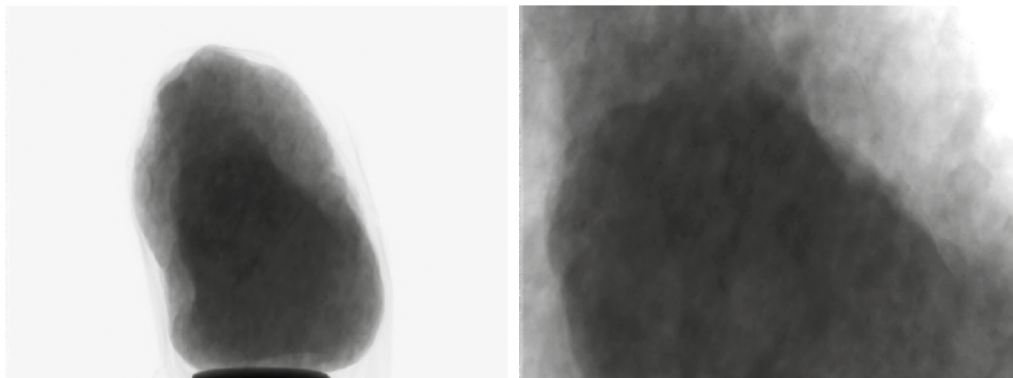
Popis měření

Vzorek byl tomografován s využitím CMOS detektoru Dexela 1512 (Varex Imaging, USA) s GOS scintilátorem a aktivní plochou 1944×1536 pixelů velikosti $74,8 \mu\text{m}$. Jako zdroj RTG záření byla použita nano-ohnisková rentgenka XWT-160-TCHR (X-Ray WorX, Německo). Parametry RTG svazku a akvizice byly zvoleny za účelem získání co nejvyššího kontrastu v získaných projekcích s ohledem na materiálové složení zkoumaného objektu [6]. Urychlovací napětí na rentgence bylo nastaveno na hodnotu 140 kV a proud resp. výkon na anodě na $140 \mu\text{A}$ resp. 19,6 W. Fotony nízkých energií byly filtrovány vrstvou mosazi a tloušťce 0,3 mm.

Byly pořízeny dvě sady tomografických dat – jedna zachycující celý vzorek (standardní tomografie dle Obr. 1 vlevo) a druhá se zacílením na oblast zájmu (ROI tomografie dle Obr. 1 vpravo). Geometrické parametry pro standardní tomografii byly stanoveny za účelem získání co nejlepšího rozlišení (největšího zvětšení) s ohledem na velikost vzorku a aktivní plochy detektoru. Nastavením vzdálenosti *FDD* na hodnotu 400,1 mm a *FOD* na hodnotu 80,0 mm bylo dosaženo zvětšení $5\times$ vedoucí v rekonstrukci k velikosti voxelu $14,96 \mu\text{m}$. Rozlišení resp. zvětšení pro ROI tomografii pak bylo požadováno přibližně $3\times$ vyšší. Vzdálenost *FOD* tedy byla upravena na 27,0 mm, čímž bylo dosaženo zvětšení $14,8\times$ vedoucí v rekonstrukci k velikosti voxelu $5,05 \mu\text{m}$.

Pro každou tomografii byly pořízeny projekce celkem ve 2880 různých úhlech natočení objektu vůči soustavě rentgenka–detektor, každá jako průměr ze dvou snímků s akviziční dobou 400 ms. Projekce byly zaznamenány postupně při devíti otočeních vzorku kolem své osy. Každá z devíti sad tak byla pořízena s krokem úhlu $360^\circ / 320$ projekcí ($1,125^\circ$). Jednotlivé sady jsou vůči sobě pootočený vždy o $320^\circ / 2880$ projekcí ($1,125^\circ$). Na rozdíl od běžné sekvenční tomografie lze tento přístup použít pro potlačení artefaktů způsobených případným nežádoucím pohybem objektu nebo některé z komponent tomografu v průběhu akvizice dat.

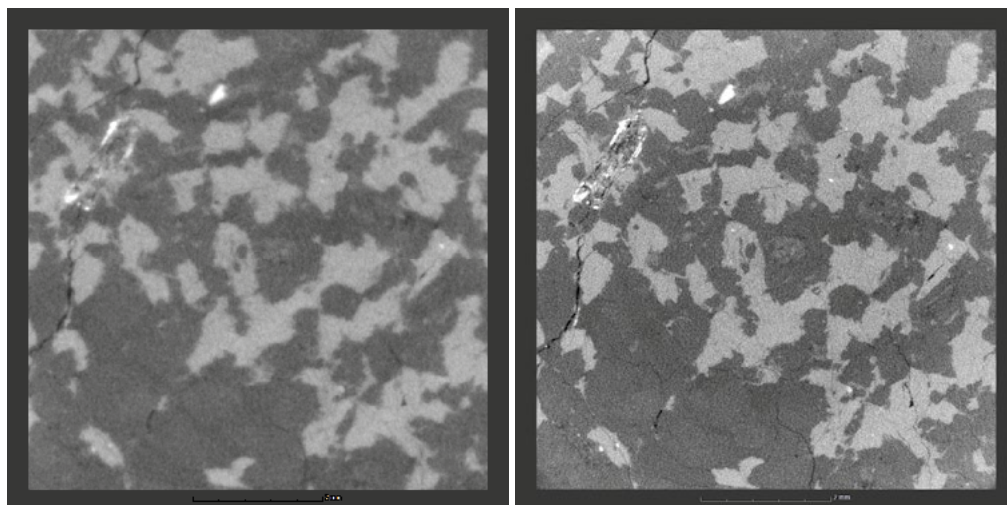
Pro korekci projekcí byla použita metoda FFC s využitím průměrovaných expozic ze scény bez objektu („*open beam*“) a bez ozáření („*dark field*“). Data pro FFC byla pořízena coby medián z 200 obrazů se stejnou dobou akvizice a parametry RTG svazku jako jednotlivá měření. Příklad projekcí je uveden na Obr. 2.



Obr. 2 Příklad projekcí (2D RTG snímků) zrna kameniva pořízených v úhlu 90° . Vlevo je uvedena projekce pro standardní tomografii s rozlišením $14,96 \mu\text{m} / \text{pixel}$, vpravo je uvedena projekce pro ROI tomografii zacílenou na střed vzorku s rozlišením $5,05 \mu\text{m} / \text{pixel}$.

3 VÝSLEDKY A DISKUSE

Z výsledků je zřejmé, že provádění ROI tomografie je za okolností vyžadujících tento přístup možné. Oblast ROI bylo možné zrekonstruovat a zobrazit s vyšším rozlišením, než by umožňoval standardní přístup, viz Obr. 3. Je zde ovšem několik faktorů, které mohou výsledek negativně ovlivnit.

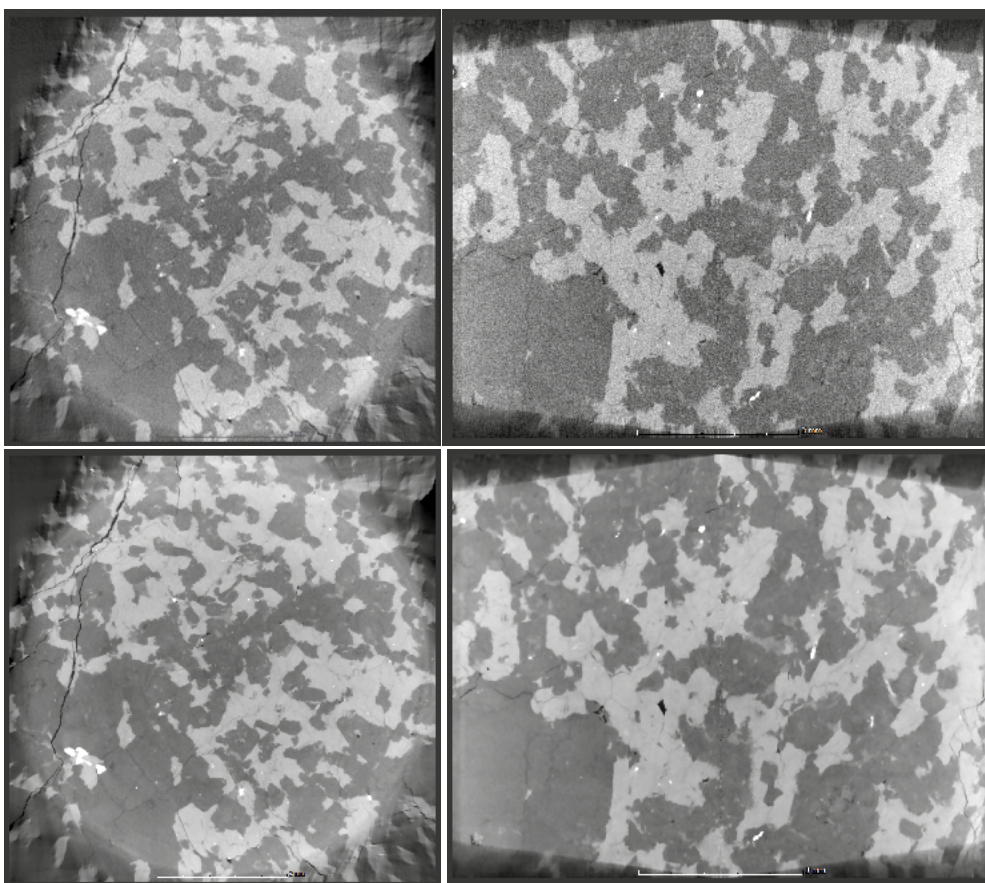


Obr. 3 Příklad vizualizace stejné oblasti tomografické rekonstrukce zrna kameniva v jednom řezu kolmém na osu rotace. Vlevo je uveden řez získaný ze standardní tomografie s rozlišením $14,96 \mu\text{m} / \text{voxel}$, vpravo je uveden řez získaný z ROI tomografie zacílené na střed vzorku s rozlišením $5,05 \mu\text{m} / \text{voxel}$.

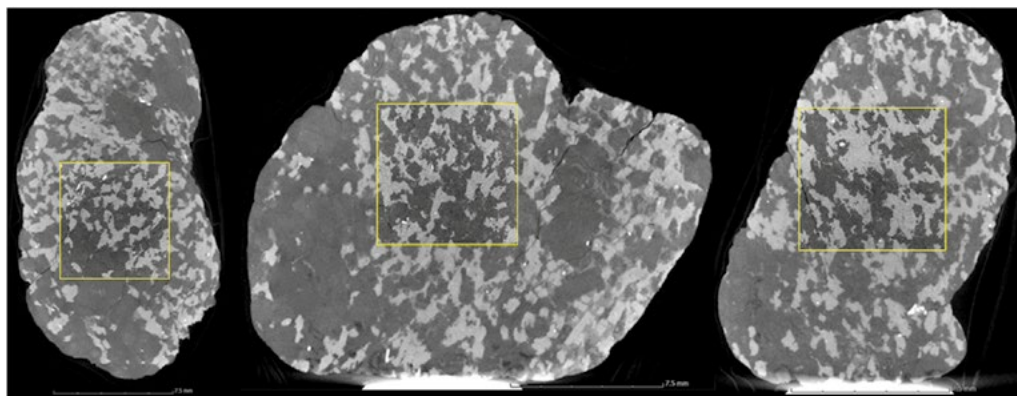
Předně lze pozorovat, že se ve výsledném zobrazení zvýšil šum. Poměr kontrastu k šumu („contrast to noise ratio“, *CNR*) byl stanoven na hodnotu 15,5 v případě standardní tomografie, zatímco ROI tomografie vykazuje *CNR* pouze 5,4. Zvýšení šumu je způsobeno zmiňovanou přítomností částí, které při rotaci přispívají k útlumu signálu, ačkoli se nachází mimo ROI, a vyšším příspěvkem rozptýleného záření při vyšší vzdálenosti objektu od detektoru. Zanedbat ovšem nelze ani fakt, že projekce pro rekonstrukci ROI postrádají oblast nezakrytou vzorkem (referenční oblast, I_0). Přestože je pro každou projekci dodržován stejný čas expozice, rentgenka není v průběhu akvizice dat zcela stabilní a způsobuje kolísání intenzity dopadající na detektor a tedy i hodnot jednotlivých pixelů. Při standardní tomografii jsou artefakty spojené s tímto chováním odstraněny škálováním každé projekce tak, aby ve všech projekcích vykazovala referenční oblast stejnou intenzitu. Tuto korekci v případě ROI tomografie uplatnit

nelze. Pro potřeby popsaného testu byl hodnocen pouze výsledný parametr CNR , příspěvek jednotlivých výše popsaných skutečností zvyšujících šum (části mimo ROI, rozptýlené záření, fluktuační rentgenky) nebyl studován. Šum lze do určité míry potlačit filtrací řezů po rekonstrukci, jak je ukázáno na Obr. 4 dole, filtrováním však může být ztracena i užitečná informace.

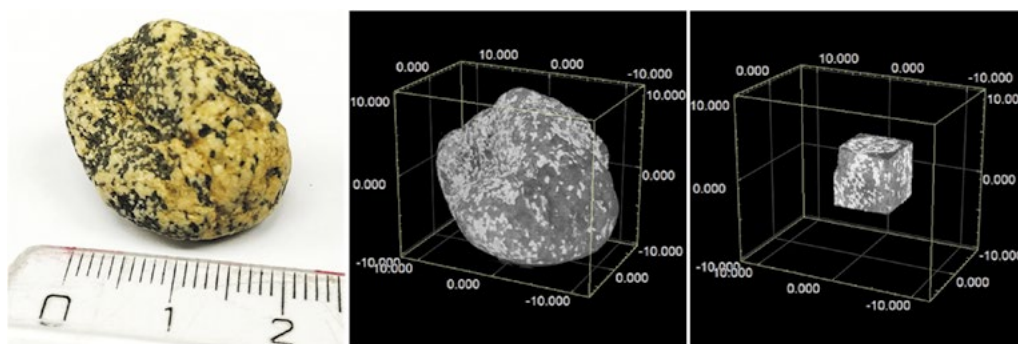
Dalším omezením je oblast, která bude rekonstruována bez přítomnosti artefaktů vyplývajících z geometrie systému a rekonstrukce. Ve standardním CT projekce objektu neopustí aktivní oblast detektoru v žádném úhlu, a proto je 3D model celý a dobře rekonstruovaný ve všech částech. Obr. 4 ukazuje příčný a čelní řez ROI tomografie po rekonstrukci celé oblasti detektoru. Je zřejmé, že ve většině výšky objektu lze plně rekonstruovat pouze válec o průměru rovném šířce detektoru děleno zvětšením (Obr. 4 vlevo). Kromě toho existuje omezení výšky tohoto válce: ve skutečnosti to není válec, protože jeho základny nejsou ploché, nýbrž mají tvar kužele. Vrcholový úhel těchto kuželů má velikost $180^\circ - BA$, kde BA je úhel rozbíhavosti RTG svazku emitovaného rentgenkou. To je velmi dobře pozorovatelné na čelním řezu vytvořeném ve středu modelu (Obr. 4 vpravo). Oblasti mimo tento válec s kuželovitými základnami tak postrádají dostatek informace a jsou značně zkreslené. Pro úspěšné fitování a namapování ROI s vysokým rozlišením do rekonstrukce celého objektu s nižším rozlišením (viz Obr. 5) je nutné zkreslené oblasti nejdříve odstranit. Z tohoto důvodu byl model získaný z ROI tomografie zacílený na střed vzorku virtuálně oříznut do konečného tvaru krychle o straně 6,936 mm (viz Obr. 6 vpravo).



Obr. 4 Příklady řezů získaných z ROI tomografie po rekonstrukci celé oblasti detektoru. Vlevo jsou uvedeny řezy v rovině kolmé na osu rotace, vpravo jsou uvedeny řezy v rovině shodné s osou rotace. Nahoře je zobrazen stav po rekonstrukci, dole pak stav po uplatnění filtrace omezující šum.



Obr. 5 Příklad namapování žlutě vyznačené ROI rekonstrukce do výsledné rekonstrukce celého objemu. Uvedeny jsou řezy středem vzorku ve třech na sebe kolmých rovinách: transversální řez kolmý na osu rotace (vlevo), frontální řez rovnoběžný s osou rotace a kolmý k normále svazku (uprostřed) a mediální řez rovnoběžný s osou rotace i s normálou RTG svazku (vpravo).



Obr. 6 Axonometrické pohledy. Reálná fotografie vyšetřovaného zrna kameniva (vlevo), model celého zrna kameniva získaný ze standardní tomografie (uprostřed), model získaný z ROI tomografie zacílené na střed vzorku po odstranění zkraslených oblastí (vpravo).

4 ZÁVĚR

V tomto příspěvku byla pozornost zaměřena na testování možností získání dat a rekonstrukce 3D virtuálního modelu při tomografii zaměřené pouze na část zkoumaného objektu. Testovací vzorek, zrno kameniva dvou dobře rozpoznatelných minerálů, byl nejprve naskenován standardním způsobem. Poté byla s 3× větším zvětšením / rozlišením tomograficky zaměřena pouze část vzorku v okolí osy rotace (ROI), zatímco části vzorku mimo tuto oblast při rotaci významnou měrou přispívaly k detekovanému obrazovému signálu.

Test prokázal, že ROI tomografie je s využitím tomografu TORATOM a rekonstrukčního software VG Studio Max 3.4 možná. Model získaný z ROI tomografie vykazuje mnohem vyšší rozlišení než model celého objektu, avšak poměr kontrastu k šumu je téměř 3× nižší, než je tomu u standardního modelu. Lze ovšem předpokládat, že v mnoha aplikacích převažuje výhoda výrazně vyššího rozlišení nad nevýhodou sníženého CNR. Rovněž byla úspěšně ověřena možnost redukce šumu filtrováním získaných tomografických řezů, je však nutno zmínit, že každé filtrování snižuje určité množství informací. V neposlední řadě byl získaný rekonstruovaný model ROI kamene úspěšně namapován na 3D model celého vzorku.

Metoda nabízí množství nových aplikací mikro-CT. Je možné plánovat samostatná tomografická měření zaměřená pouze na oblast zájmu nebo skenovat části objektů větší než aktivní oblast detektoru. Je také možné použít fúzi dvou tomografických měření, kde jedna tomografie poskytuje model celého objemu zkoumaného objektu a druhá model části vnitřní struktury s vysokou rozlišovací schopností. Metodu lze provést pomocí jednoho

zobrazovacího páru rentgenka–detektor, ale otevírají se také nové možnosti využití patentované schopnosti simultánního tomografického měření dvěma zobrazovacími páry na zařízení TORATOM.

Poděkování

Výzkum byl realizován v rámci projektu RVO 68378297 Akademie věd České republiky a projektu specifického vysokoškolského výzkumu Vysokého učení technického v Brně č. FAST-J-20-6506.

Reference

- [1] Skarzynski L., Tejchman J. Experimental Investigations of Fracture Process in Concrete by Means of X-ray Micro-Computed Tomography. *Strain*. 2016, Vol. **52**(1), pp. 26-45. DOI: 10.1111/str.12168. ISSN 1475-1305.
- [2] Kumpová I., Vopálenký M., Fila T., Kytýř D., Vavřík D., Pichotka M., Jakůbek J., Keršner Z., Klon J., Seitl S., Sobek J. On-the-Fly Fast X-Ray Tomography Using a CdTe Pixelated Detector—Application in Mechanical Testing. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2018, Vol. **65**(12), pp. 2870-2876. DOI: 10.1109/TNS.2018.2873830. ISSN 0018-9499.
- [3] Ojeda-Magaña B., Ruelas R., Quintanilla-Domínguez J., Robledo-Hernández J. G., Sturrock C. J., Mooney S. J., Tarquis A. M. Detection and quantification of pore, solid and gravel spaces in CT images of a 3D soil sample. *Applied Mathematical Modelling*. 2020, Vol. **85**, pp. 360-377. DOI: 10.1016/j.apm.2020.04.021. ISSN 0307-904X.
- [4] Vavřík D., Žemlička J., 2015. Rentgenové zobrazování plastik a obrazů. In: Drdácáký, M., Sližková, Z., Valach, J. *Příspěvek technických věd k záchraně a restaurování památek*. Praha: ÚTAM AV ČR, s. 320-329. ISBN 978-80-86246-49-9.
- [5] Fila T., Vavřík D. A multi-axial apparatus for carrying out x-ray measurements, particularly computed tomography. EU. EP 2835631 Patentový dokument. Uděleno 24.02.2016.
- [6] Vopálenký M. ToraPar 1.0-2018: Software for setting up the parameters of computed tomography [software]. Dostupné z: <http://www.itam.cas.cz/Software/ToraPar/index.html>.

4.

Stavební mechanika

Structural Mechanics

CENZUROVANÉ VZORKOVÁNÍ JAKO NÁSTROJ V ÚLOHÁCH SPOLEHLIVOSTI

TRIANGULATION-BASED REJECTION SAMPLING IN RELIABILITY ANALYSIS

Aleksei Gerasimov^{*1} Miroslav Vořechovský¹

^{*}Aleksei.Gerasimov@vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

Článek popisuje simulační metodu pro odhad pravděpodobnosti poruchy, ve které dochází k redukcí nutného počtu vyčíslení modelu (rozhodnutí o poruše nebo neporuše) a která staví pomocnou geometrickou konstrukci v prostoru vstupních náhodných proměnných. Konkrétně je použito cenzurování, kdy je na základě již zjištěných informací vytvářena Deloneho triangulace definičního oboru a pokud je simulační metodou typu Monte Carlo navržen vzorek, který spadá do simplexu s vrcholy buďto jen porucha nebo jen neporucha, vzorek je zamítnut. Díky popsanému rozdělení domény na disjunktní podoblasti je výrazně urychleno její prohledání a zmapování. Následně navrhuje pomocí sestavené triangulace získávat odhady pravděpodobnosti poruchy. Metoda ukazuje rychlou konvergenci v úlohách několika náhodných proměnných, však s nárůstem dimenzi exponenciálně narůstá složitost geometrie a tím i výpočetní náročnost. Chod algoritmu je prezentován na dvou (2D a 3D) numerických příkladech.

Klíčová slova

Spolehlivost, pravděpodobnost poruchy, adaptivní vzorkování, Deloneho triangulace, fyzikální prostor

Abstract

The paper describes a new simulation method for estimation of failure probability in which we propose to reduce the total number of model evaluations (leading to decision about failure or success) and which builds auxiliary geometrical "scaffold" in the design space of input random variables. In particular, we employ a kind of censoring: we build a Delaunay triangulation based on the available information and when a newly proposed Monte Carlo sample falls into simplex whose vertices are either solely failures or successes, we disregard such a sampling point. By using this division into disjuncts regions, the exploration stage and its mapping of the domain is dramatically accelerated. Delaunay triangulation is used to provide flexible, adaptive, lock-free mesh-like geometric structure. Moreover, the latter is used as surrogate model for failure probability estimation. The method shows fast convergence in low dimensional problems. However, the complexity of geometry grows exponentially with dimension of problem. There are two examples (of 2D and 3D problems) presented.

Key words

Adaptive Sampling, Delaunay triangulation, Voronoi tessellation, sample space, failure probability

1 ÚVOD A SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Tento článek je věnován využití Deloneho triangulace v simulační metodě pro odhad spolehlivosti. Spolehlivostními úlohami se rozumí úlohy založené na určení pravděpodobnosti zadaných (nepříznivých) jevů, obvykle nazývaných pravděpodobnost poruchy p_f , a to za předpokladu, že je definováno rozdělení $f(\mathbf{x})$ vstupního náhodného vektoru a deterministický model $g(\mathbf{x})$. Obecněji se jedná o získání odhadů statistik $T(Z)$, transformovaného náhodného vektoru $Z = g(\mathbf{X})$. Model je často složitý algoritmus a analytické řešení úlohy není možné. Uchylujeme se tedy k simulačním metodám, kde deterministickou funkci $g(\mathbf{x})$ opakovaně vyčísľujeme s patřičnými vstupy – realizacemi vektoru \mathbf{X} . Úkolem je řešení úlohy na základě omezeného počtu simulací.

Náší premisou je, že efektivita každé spolehlivostní metody přímo souvisí s tím, v jaké míře využívá prostorových informací. Z tohoto hlediska lze metodu Monte Carlo vnímat jako základní metodu, která aplikuje ryze statistický přístup k pravděpodobnosti a není žádným způsobem dotčena ani prostorovým rozložením oblastí poruchy, ani rozdělením pravděpodobnosti, ani dimenzí úlohy. Z toho plynou její výhody a nevýhody. Výhodou

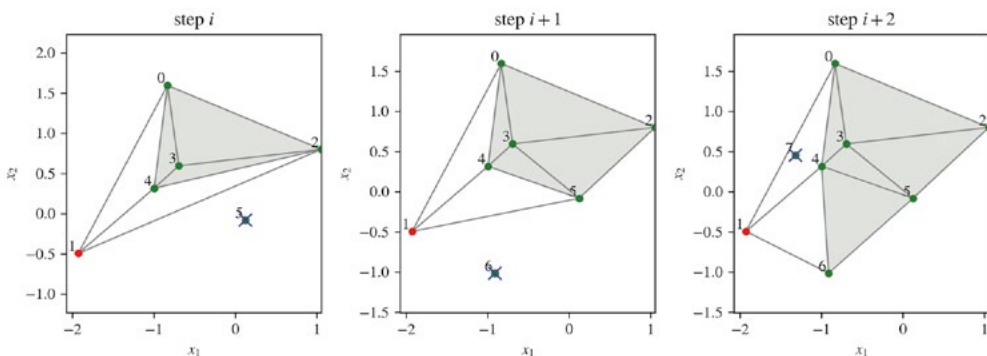
je nestrannost a absolutní robustnost, nevýhodou je fakticky naprostá nepoužitelnost právě pro odhady spolehlivosti. Důvodem je fakt, že pravděpodobnost poruchy je v reálných podmínkách velmi malá ($p_f \approx 10^{-6}$) a odhad takto malé pravděpodobnosti vyžaduje řádově $10/p_f$ vyčíslení modelu $g(\mathbf{x})$. Je třeba uvážit, že vyčíslení $g(\mathbf{x})$ bývá typicky velmi časově náročné. Od metody Monte Carlo je odvozena metoda Importance Sampling (IS), která je základem množství současných sofistikovaných metod a algoritmů (např. [1] [2]). Obecně, kvalita odhadu IS závisí na volbě vzorkovacího rozdělení $h(\mathbf{x})$, do kterého jsou zahrnuty předpoklady o umístění oblastí poruchy. Nalezení optimální vzorkovací hustoty je nutnou součástí výše citovaných algoritmů, jsou tomu věnovány i samostatné publikace [3] [4]. Problém spočívá v tom, že jelikož optimálním ve smyslu IS je vzorkování v oblastech poruchy, tak hledaným optimálním vstupem metody je to, co bychom očekávali jako její výstup. IS zůstává metodou simulační, tj. informace o sousedících vzorcích není nijak využita. Dekompozice prostoru triangulací Deloneho je právě jedním ze způsobů získávání a využití topologických informací.

Jinou skupinu tvoří metody aproximační. Ukázkovými metodami založenými na geometrii problému jsou metody FORM/SORM. Na základech metody FORM jsou postaveny dokonce některé přístupy v normách pro navrhování konstrukcí. Metoda FORM/SORM však zdaleka není univerzální. Velmi rozšířené jsou také metody náhradní plochy odezvy založené buď na regresní analýze, nebo na krigingu. Jako jejich nevýhody lze zmínit riziko přetrévání a někdy obtížné určení vhodných parametrů metod. Breitung [5] na příkladě Subset Simulation ukazuje, že spoléhání se na číselné hodnoty funkce $g(\mathbf{x})$, což je obvyklé u tohoto typu metod, může být zavádějící.

Předložená metoda cenzurovaného vzorkování nabízí nový geometrický přístup ke spolehlivostním úlohám. Zaměřením je získávání co nejlepších odhadů pravděpodobnosti poruchy na základě daného souboru vzorků (tj. vektorů hodnot vstupních proměnných doplněných o informaci, zda v nich nastává porucha). Motivací je získávání informací z topologie problému pro redukci počtu simulací v případech, kdy náročnost deterministického modelu $g(\mathbf{x})$ výrazně převyšuje náročnost metod výpočtové geometrie.

2 METODA CENZUROVANÉHO VÝBĚRU

Jak už bylo zmíněno, v rámci simulačních metod funkci $g(\mathbf{x})$ opakovaně vyčísľujeme s patřičnými realizacemi vektoru \mathbf{X} (tj. číselnými hodnotami parametrů modelu, v tomto textu je nazýváme *vzorky*). Základní myšlenka metody je velmi jednoduchá: pomocí Deloneho triangulace vytváříme „filtr“, do kterého použijeme vzorky před tím, než provedeme skutečný výpočet modelu $g(\mathbf{x})$. Místo toho, že bychom přímo prováděli vyčíslení zadaného vzorku, nejdřív ověříme pomocí triangulace, zda se nachází v simplexu vymezeném vrcholy se stejným typem výsledku (buď porucha, nebo neporucha). Pokud to nastane, vzorek je zamítnut, viz. šedé oblasti v Obr. 1. Záměrem je „vyfiltrovat“ vzorky, u kterých předjíáme výsledek vyčíslení podle sousedících vzorků (vrcholů).



Obr. 1 Metoda cenzurovaného výběru, při kterém se Deloneho triangulace ve skutečném prostoru používá pouze jako pomocný nástroj pro omezení zbytečných simulací v již prozkoumaných oblastech. Přidání dalších vzorků je tak dovoleno buď ve vnější domně, nebo ve „smíšených simplexech“ (tj. ve simplexech, jejichž vrcholy body signalizující poruchu a neporuchu). Červený bod znázorňuje poruchu.

Vzorkování

Postup vzorkování je následující:

- sestavíme triangulaci na základě již provedených simulací;

- jakýmkoliv způsobem (například, náhodně) vybereme jeden vzorek (tzv. kandidáta), ve kterém bychom chtěli provést simulaci, tj. vyčíslit hodnotu funkce $g(\mathbf{x})$;
- najdeme, do jakého simplexu vzorek patří:
 - pokud patří do simplexu, ve kterém *žádnému* vrcholu nenaleží porucha, tak implicitně předpokládáme, že v navrženém místě porucha nenastane, vzorek odmítáme;
 - pokud patří do simplexu, ve kterém porucha nastává v *každém* vrcholu, tak implicitně předpokládáme, že v navrženém místě taky nastane porucha, vzorek odmítáme;
 - pokud patří do takového simplexu, že porucha nastává pouze v *některých* jeho vrcholech (tzv. smíšený, neboli nerozhodnutý simplex), tak výsledek v tomto místě považujeme za neurčitý, vzorek přijímáme, tímto **zpřesňujeme hranici poruchy (exploitation)**;
 - pokud vzorek nepatří do žádného simplexu, tak výsledek v tomto místě považujeme za neurčitý, vzorek přijímáme, tímto **provádíme expanzi (exploration)**;
- pokud vzorek byl námi přijat, tak v něm provedeme simulaci, pak aktualizujeme triangulaci;
- celý postup opakujeme.

Dekompozice prostoru

Zvlášť v rámci nabízeného geometrického přístupu je důležité, že číselnými hodnotami vstupních parametrů operujeme jako souřadnicemi v tzv. prostoru vstupních parametrů modelu. Prováděním dekompozice ve skutečném prostoru modelu řešíme dříve zmíněný problém distorze [6], vzorkováním pomocí metody Monte Carlo (nebo i Importance Sampling) se vyhýbáme problému vybalancování mezi vnitřní a vnější doménou.

Triangulací rozčleňujeme prostor na jednotlivé disjunktní „prvky“ – simplexu, které sjednocením tvoří bezpečnou oblast (S), oblast poruchy (F) a nerozhodnutou oblast (M). Ty spolu s neprozkoumanou oblastí (vnější doménou) O tvoří úplnou soustavu jevů.

$$\left(\bigcup_{i=1}^{n_s} \Delta_{S_i} \right) \cup \left(\bigcup_{i=1}^{n_f} \Delta_{F_i} \right) \cup \left(\bigcup_{i=1}^{n_m} \Delta_{M_i} \right) \cup \mathbf{O} = \mathbf{S} \cup \mathbf{F} \cup \mathbf{M} \cup \mathbf{O} = \Omega \quad (1)$$

Míry jednotlivých regionů odhadneme numerickou integrací – metodou Monte Carlo, nebo Importance Sampling s vhodně zvolenou vzorkovací hustotou $h(\mathbf{x})$. Pro výpočet původní model $g(\mathbf{x})$ už nepotřebujeme.

$$\sum_{i=1}^{n_s} P(\Delta_{S_i}) + \sum_{i=1}^{n_f} P(\Delta_{F_i}) + \sum_{i=1}^{n_m} P(\Delta_{M_i}) + P(\mathbf{O}) = P(\mathbf{S}) + P(\mathbf{F}) + P(\mathbf{M}) + P(\mathbf{O}) = 1 \quad (2)$$

Vyhodnocení

Předložená metoda je zdánlivě simulační. Pomocí metody multiple importance sampling [7] lze vyjádřit nevychýlený estimátor, který korektně převáží vzorky. Každý je totiž získán v odlišných podmínkách, z jiného cenzurovaného rozdělení, je to v podstatě tzv. model jednoho vzorku.

$$\hat{p}_f = \sum_{i=1}^{N_{\text{sim}}} \mathbf{I}_F(g(\mathbf{x}_i)) \frac{f(\mathbf{x}_i)}{\sum_{j=1}^{N_{\text{sim}}} h_j(\mathbf{x}_i)} \quad (3)$$

Zde $\mathbf{I}_F(g)$ je indikátorová funkce, $h_j(\mathbf{x}_i)$ je faktická vzorkovací hustota, která je výsledkem cenzurování v j -tem kroku. Lze ji zapsat takto:

$$h(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{f(\mathbf{x})}{1 - P(S) - P(F)}, & \mathbf{x} \notin \mathbf{S}, \mathbf{F} \\ 0, & \mathbf{x} \in \mathbf{S}, \mathbf{F} \end{cases} \quad (4)$$

Takto formulovaný (simulační) odhad vyžaduje uchovávat triangulaci z každého kroku algoritmu pro korektní převážení následujících vzorků. Dalším problémem je, že s postupným zpřesněním S a F vzorky získávají čím dál menší váhu.

Místo toho bychom mohli již sestavenou triangulaci použít jako náhradní plochu odezvy a zřejmým způsobem bodový odhad získat sečtením mír všech poruchových simplexů a částečných mír smíšených simplexů. V tuto chvíli metoda ztrácí svou simulační podstatu a stává se čistě aproximační.

$$\hat{p}_f = \sum_{i=1}^{n_f} P(\Delta_{F_i}) + \sum_{i=1}^{n_m} w_i P(\Delta_{M_i}) = P(\mathbf{F}) + \sum_{i=1}^{n_m} w_i P(\Delta_{M_i}) \quad (5)$$

Smišené simplexý můžeme započítávat jednoduše podle počtu vrcholů v poruše:

$$w^s = \sum_{j=1}^{d+1} \frac{\mathbf{I}_F(g_i)}{d+1}, \quad (6)$$

kde d je dimenze prostoru. Vrcholy můžeme taky převážít podle hustoty. Možností je, samozřejmě, neomezeně mnoho.

$$w^w = \frac{\sum_{j=1}^{d+1} \mathbf{I}_F(g_i) f(\mathbf{x}_j)}{\sum_{j=1}^{d+1} f(\mathbf{x}_j)} \quad (7)$$

Tyto odhady lze navíc doplnit Voroného teselací [8] [6], nebo libovolnou jinou aproximací.

3 NUMERICKÉ PŘÍKLADY

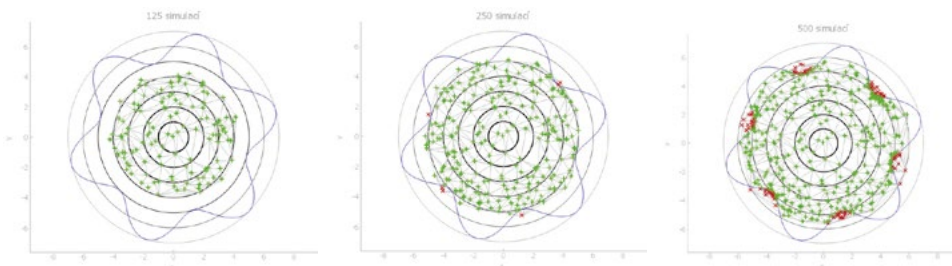
2D příklad

Pro úlohu dvou standardizovaných nezávislých Gaussovských náhodných proměnných zvolíme funkci sinus, zadanou však v polárních souřadnicích $g(r, \varphi) = 6 + \sin(6\varphi) - r$ (Obr. 2). Referenční odhad pravděpodobnosti poruchy $p_f^S = 6,7 \cdot 10^{-7}$ je získán metodou importance sampling.

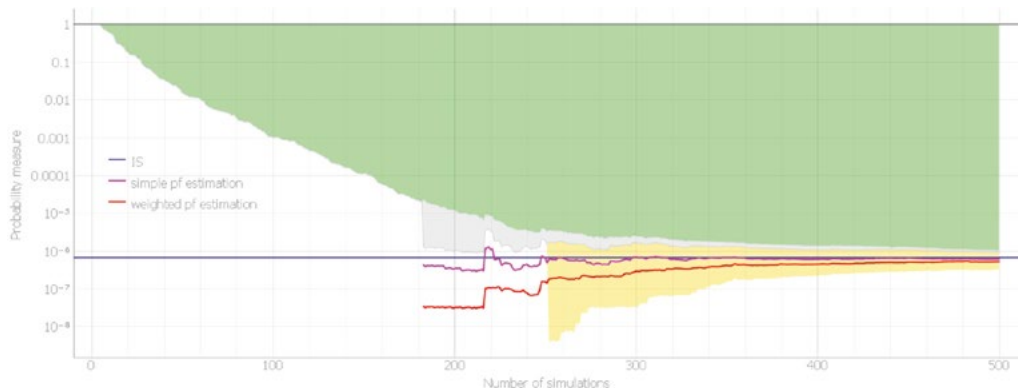
Na Obr. 3 je zachycen průběh aproximace p_f představenou metodou. Na vodorovné ose je počet vyčíslení funkce $g(\mathbf{x})$, na svislé ose je pravděpodobnost poruchy p_f . Zelená oblast vyjadřuje pravděpodobnost obsaženou v „zelených“ simplexech (bezporuchová oblast). Spodní okraj žluté oblasti je postupně narůstající pravděpodobnost v ryze červených (poruchových) simplexech. Rozmezí mezi spodní hranou zelené oblasti a spodní hranou žluté oblasti odpovídá dvěma typům oblastí: (i) smišené simplexý, (ii) neprozkoumané oblasti definičního oboru. Pravděpodobnost obsažená ve smišených simplexech odpovídá rozpětí žluté oblasti. Pokud se tato oblast rozdělí podle vztahu (6), získáváme odhad pravděpodobnosti poruchy vyznačený fialovou čarou, podle vztahu (7) – červenou čarou. Pravděpodobnost spojená s neprozkoumanými oblastmi odpovídá výšce šedé oblasti. Šedá oblast je vykreslená od okamžiku nalezení první poruchy a žlutá oblast je vykreslená od okamžiku uzavření prvního poruchového simplexu.

Výsledné odhady (po 500 simulací) jsou: $p_f^S = 6,3 \cdot 10^{-7}$, $p_f^W = 5,4 \cdot 10^{-7}$; viz. vztahy (6) a (7).

Míry oblastí jsou: $P(\mathbf{F}) = 3,3 \cdot 10^{-7}$, $P(\mathbf{M}) = 6,2 \cdot 10^{-7}$, $P(\mathbf{O}) = 1,1 \cdot 10^{-7}$.



Obr. 2 Ukázka účinnosti nabízené metody Monte Carlo s cenzurováním na příkladu funkce v prostoru dvou standardizovaných Gaussovských náhodných proměnných. Je vidět, že do vnitřních oblastí nejsou přidávány další body (aktuální počet bodů je vždy uveden nahoře). Barvy znázorňují, zda došlo k poruše $(g(\mathbf{x}) < 0)$.



Obr. 3 Průběh aproximace pravděpodobnosti poruchy.

3D příklad

Pro 3D příklad zvolíme funkci minima $g = \min(x_1, x_2, x_3) - 0,001$ tří náhodných nezávislých veličin $X_{1,2,3} \sim \text{Rayleigh}(1)$. Pravděpodobnost poruchy pro funkci minima můžeme obecně vyjádřit jako kvantil rozdělení extrémních hodnot (značení $1:n$ vyjadřuje nejmenší z n shodně rozdělených nezávislých náhodných veličin).

$$p_f = P(\min(X) \leq x) = F_{1:n}(x) = 1 - [1 - F_1(x)]^n \quad (8)$$

Vyjdeme z distribuční funkce Rayleighova rozdělení $F_1(x; \sigma) = 1 - e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$, které je speciálním případem Weibullova rozdělení. Analytické řešení distribuční funkce minima dosazením do (8) je snadné:

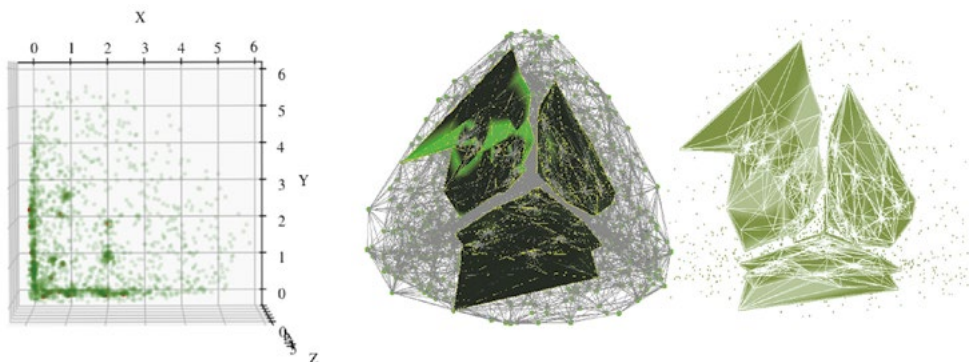
$$F_{1:n}(x) = 1 - [1 - F_1(x; \sigma)]^n = 1 - e^{-\frac{nx^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

Dosazením získáme řešení $p_f = P(g \leq 0,001) = F_{1:3}(0,001) = 1 - e^{-\frac{3 \cdot 0,001^2}{2}} \approx \frac{3 \cdot 0,001^2}{2} = 1,50 \cdot 10^{-6}$.

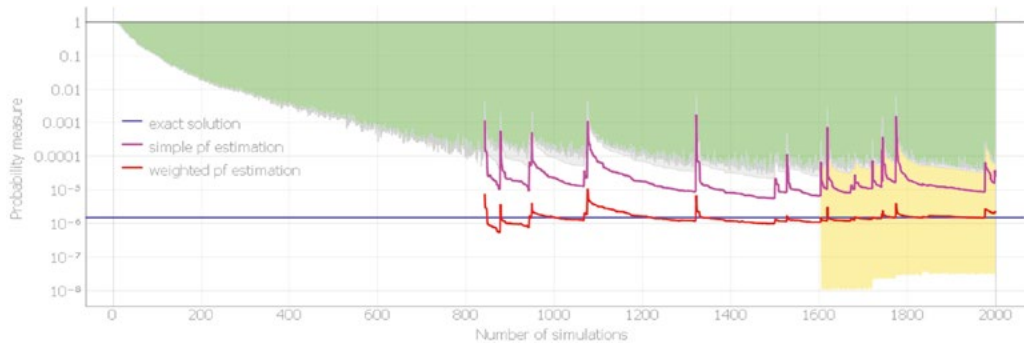
Výsledné odhady (po 2000 simulací) jsou: $p_f^s = 2,9 \cdot 10^{-5}$, $p_f^w = 2,2 \cdot 10^{-6}$.

Míry oblastí jsou: $P(\mathbf{F}) = 3,1 \cdot 10^{-8}$, $P(\mathbf{M}) = 1,1 \cdot 10^{-4}$, $P(\mathbf{O}) = 1,5 \cdot 10^{-5}$

Je vidět, že složitost úlohy exponenciálně roste s narůstající dimenzí; po provedení 2000 simulací triangulace obsahuje 12194 simplexů (Obr. 4). Úloha je zvláště obtížná kvůli rozsáhlému rozhraní mezi poruchovou a neporuchovou oblastí (Obr. 5).



Obr. 4 Zkonstruované simplexity v 3D problému tvoří čtyřstěny. Prostřední a pravý obrázek ukazuje identifikované rozhraní mezi poruchovou a neporuchovou oblastí.



Obr. 5 Průběh aproximace pravděpodobnosti poruchy v 3D příkladu.

4 ZÁVĚR

Příspěvek předkládá myšlenku využití dostupné informace o poruchách a neporuchách ve zkoumaném prostoru náhodných veličin pro úsporu počtu vyčíslení modelu v úlohách výpočtu pravděpodobnosti poruchy. Je využito metod výpočtové geometrie ke konstrukci náhradní plochy odezvy a cenzurování vzorků v simulační metodě, které s vysokou pravděpodobností nepřinášejí novou informaci. V další práci se autoři zaměří na využití myšlenky v prostorech vyšších dimenzí (vyšší počet náhodných veličin) a na vývoj kritéria výběru kandidátů v sekvenčně adaptivním vzorkování.

Poděkování

Tento příspěvek byl vytvořen za finanční podpory projektu specifického výzkumu VUT v Brně FAST-J-20-6287.

Použitá zdroje

- [1] PAPAIOANNOU, Iason, Costas PAPADIMITRIOU a Daniel STRAUB. Sequential importance sampling for structural reliability analysis. *Structural Safety* [online]. 2016, 62, 66-75 [cit. 2020-11-27]. ISSN 0167-4730. Dostupné z: doi:10.1016/j.strusafe.2016.06.002
- [2] AU, Siu-Kui a James L. BECK. Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation. *Probabilistic Engineering Mechanics* [online]. 2001, 16(4), 263-277 [cit. 2020-11-27]. ISSN 02668920. Dostupné z: doi:10.1016/S0266-8920(01)00019-4
- [3] MORIO, Jérôme. Importance sampling: how to approach the optimal density?. *European Journal of Physics* [online]. 2010, 31(2), 41-48 [cit. 2020-11-27]. ISSN 0143-0807. Dostupné z: doi:10.1088/0143-0807/31/2/L01
- [4] HINRICHS, Aicke. Optimal importance sampling for the approximation of integrals. *Journal of Complexity* [online]. 2010, 26(2), 125-134 [cit. 2020-11-27]. ISSN 0885064X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jco.2009.11.003
- [5] BREITUNG, Karl. The geometry of limit state function graphs and subset simulation: Counterexamples. *Reliability Engineering & System Safety* [online]. 2019, 182, 98-106 [cit. 2020-11-27]. ISSN 09518320. Dostupné z: doi:10.1016/j.ress.2018.10.008
- [6] GERASIMOV, Aleksei a Miroslav VOŘECHOVSKÝ. Dekompozice prostoru v spolehlivostní úloze pro adaptivní vzorkování. In: JUNIORSTAV 2020 [online]. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2020, s. 468-473 [cit. 2020-11-26]. ISBN 978-80-86433-73-8. Dostupné z: http://www.juniorstav.cz/wp-content/uploads/2020/02/Sbornik_Komplet_FINAL-uprava.pdf
- [7] VEACH, Eric. Robust Monte Carlo Methods for Light Transport Simulation [online]. Stanford, 1997 [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: http://graphics.stanford.edu/papers/veach_thesis/. Ph.D. dissertation. Stanford University.
- [8] GERASIMOV, Aleksei. Pokročilé simulační metody pro spolehlivostní analýzu konstrukcí. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Vedoucí práce Miroslav Vořechovský.

EXPLORATION OF SIMPLE KRIGING METHOD

Gizem Erdinç^{*1}, Miroslav Vořechovský¹

^{*}Gizem.Erdinc@vut.cz

¹Institute of Structural Mechanics, Brno University of Technology, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Czech Republic

Abstract

Approximation methods have become commonplace to avoid the computational burden of engineering problems analysis. In this paper the Kriging approximation which is a popular surrogate model to approximate deterministic noise-free data is explained with a basic theory and a smart interactive workflow of a simple version of the kriging method in literature. Even if Kriging is cheap to evaluate, and also have proven to be very useful for estimating tasks, it highly depends on its parameters. For this reason, an application of the interactive simple kriging demonstration is presented with five experiments to explore the behavior of Kriging approximation. All experiments are run separately, and the results are presented. Then finally, it is discussed, and its shortcomings are noted.

Key words

Kriging approximation, kriging demonstration, visualization

1 MOTIVATION

Many complex real-world phenomena are difficult to study directly using controlled experiments. Instead, as an alternative, the use of computer simulations has become commonplace. However, due to the computational cost of these high-fidelity simulations, surrogate models (also known as metamodels) are used to predict the outcome of a black-box function at any sample, providing that the outcomes at a few other samples are known. By the surrogate modelling, high computational requirements can be significantly reduced in comparison with the actual functions. Quadratic Response Surfaces or other surrogate models in [1], are commonly used even if they are limited to local interpolation. To avoid this problem, Polynomial Chaos [2], [3] can be used. However, the definitions of the polynomial degrees are tricky [4]. In this paper, Kriging which is a popular surrogate model to approximate deterministic noise-free data is used. Kriging approximation is compact and cheap to evaluate and have proven to be very useful for tasks such as optimization [5], design space exploration, visualization, prototyping, and sensitivity analysis [6]. The paper is structured as follows: Basic theory of Kriging is described in Section 2, Section 3 is focused on interactive simple kriging demonstration for an easy way to play with Kriging, Section 4 presents the results of the model and then it is discussed in following Section 5.

2 BASIC THEORY OF THE KRIGING APPROXIMATION

The Kriging approximation is a nonparametric interpolation modelling that hypothesizes the true function is the realization of a Gaussian process. This model employs the training samples and the corresponding outputs to construct the surrogate model for forecasting the output. Up to now, Kriging approximation has been widely used in applications of engineering problems [7], [8]. In Kriging, the predicted value at a given point not only depends on the design parameters but also is affected by the distribution of samples. Kriging assumes that a response function $g(u)$ is composed of a regression model $f(u)\beta$ and stochastic process $Z(u)$ as follows:

$$g(u) = f(u)\beta + Z(u) \quad (1)$$

In Eq. (1), $f(u)$ is the basic regression function which can be assumed to be any function. There are three types of regression trends in the Kriging model, i.e., constant regression, linear regression and quadratic regression [9]. However, taking it to be a constant value has been reported to be generally sufficient [10], [11]. Also, β is the corresponding trend coefficient vector. For the same reason that normal distribution widely used in statistical theory and modeling, the Gaussian process is widely used in practice, which is convenient, flexible and usually quite realistic [12], [13]. Therefore, $Z(u)$ is defined using a Gaussian process with zero mean and covariance between two points of space u_1 and u_2 as follows:

$$C[Z(u_1), Z(u_2)] = \sigma_z^2 R(\theta, \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2) \tag{2}$$

where σ_z^2 is the process variance and $(\theta, \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2)$ is the correlation function defined by its set of parameters θ . There are several models to define the correlation function, such as exponential function, linear function, spherical function, cubic function and spline function. However, in this paper, the spherical, exponential and gaussian functions are used.

3 INTERACTIVE SIMPLE KRIGING DEMONSTRATION

In this section, a simple workflow which was discovered by [14] is presented for calculating the simple kriging estimate and the estimation variance for a local uncertainty model. To demonstrate the workflow a simple problem with only 3 data is used for speed and interpretability of the results. Firstly, in the case of making an estimate at some unsampled location with location vector (\mathbf{u}), how it can be done this given data, (\mathbf{u}_1), (\mathbf{u}_2), and (\mathbf{u}_3)? It would be natural to use a set of linear weights to formulate the estimator given the available data.

$$z^*(\mathbf{u}) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} z(\mathbf{u}_{\alpha}) \tag{3}$$

where z is the property of interest (e.g., failure probability etc.), z^* is the estimation, n is the number of sample and λ defines the weights of each sample. Moving from Eq. 3, an unbiased constraint could be added to impose the sum of the weights equal to one. Instead of that, the remainder of the weight (one minus the sum of weights) is assigned to the global average; therefore, in case of having no informative data it can be estimated with the global average (\bar{z}) of the property of interest.

$$z^*(\mathbf{u}) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} z(\mathbf{u}_{\alpha}) + \left(1 - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}\right) \bar{z} \tag{4}$$

To make a stationarity assumption, let's assume that the Eq. 4 is working with residuals (y^*),

$$y^*(\mathbf{u}) = z^*(\mathbf{u}) - \bar{z}(\mathbf{u}) \tag{5}$$

If this form is substituted into the Eq. 5 the estimator is simplified since the mean of the residual is zero

$$y^*(\mathbf{u}) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} y(\mathbf{u}_{\alpha}) \tag{6}$$

while satisfying the unbiased constraint. Now the next question is what weights should be used? The kriging approach accomplishes this by calculating the best linear unbiased weights for the local data to estimate at the unknown location. Furthermore, kriging provides a measure of the accuracy of the estimate! This is the kriging estimation variance (also known as the kriging variance).

$$\sigma_E^2(\mathbf{u}) = C(0) - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} C(\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_{\alpha}) \tag{7}$$

where $C(0)$ and $C(\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_{\alpha})$ defines local data covariance and covariance between local data and unknown locations respectively. It can be asked what is 'best' about this estimate? Kriging estimates are the best because they minimize the above estimation variance! In this example, a statistic is needed to quantify spatial continuity. A convenient method is the Semivariogram. More information of the Semivariogram can be found in [14].

4 RESULTS

As mentioned before, the goal of this paper is exploring the behavior of the Kriging approximation. The interactive workflow is developed by [14] and it is presented with 3 different experiment cases here to demonstrate the effect of the changes of some properties such as lag offsets, positions of data each other and the nugget effect on these 3 outputs: Simple kriging estimate, simple kriging variance and simple kriging weights. Case studies are below. Firstly, as the initial stage of the estimation, the spherical structure ranged as 100 meters by 100 meters with major (hmajor) and minor (hminor) lag offsets is considered. In this stage the simple kriging estimate is 2.0 and the simple kriging variance is 1.0 as expected. As the first case, when the major range (hmajor) is increased (for instance up to 1200 meters in Fig. 1), it is seen that number 2 gains weight (0.63) and the simple kriging variance

is 0.6 while the estimate is still 2.0. This means that with increasing the major range value it can be got less uncertainty.

In the second experiment case, sample points (data) are moved in closer to each other to have a good correlation and the effect of this situation is investigated. From the Fig. 2, all the data have weights; 0.2 for data number 1, 0.43 for data number 2 and 0.39 for data number 3. Here, the simple kriging estimate is increased to 2.19 and the simple kriging variance is decreased to 0.12. This situation means that uncertainty between samples taken close each other will be small.

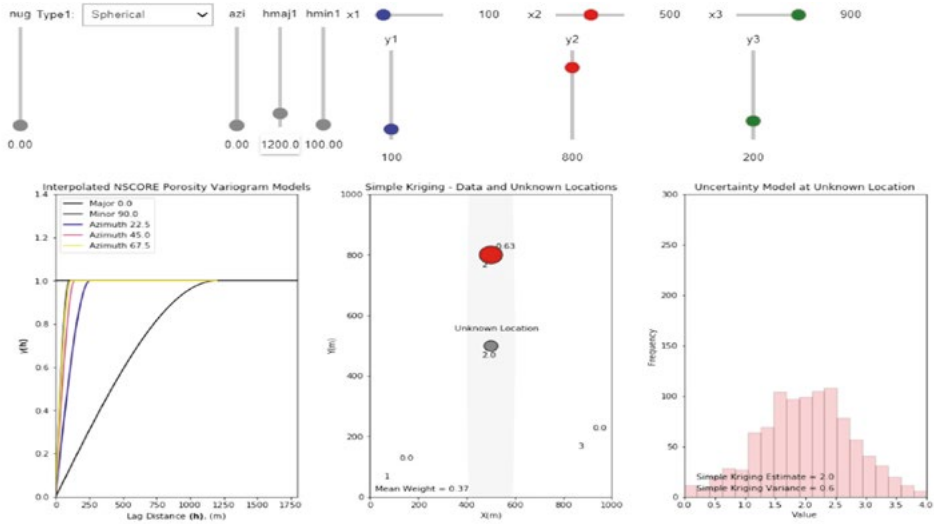


Fig. 1 Effect of h range with the representation of lag distance (h) on the left, data on the middle, value of simple kriging estimate and variance on the right.

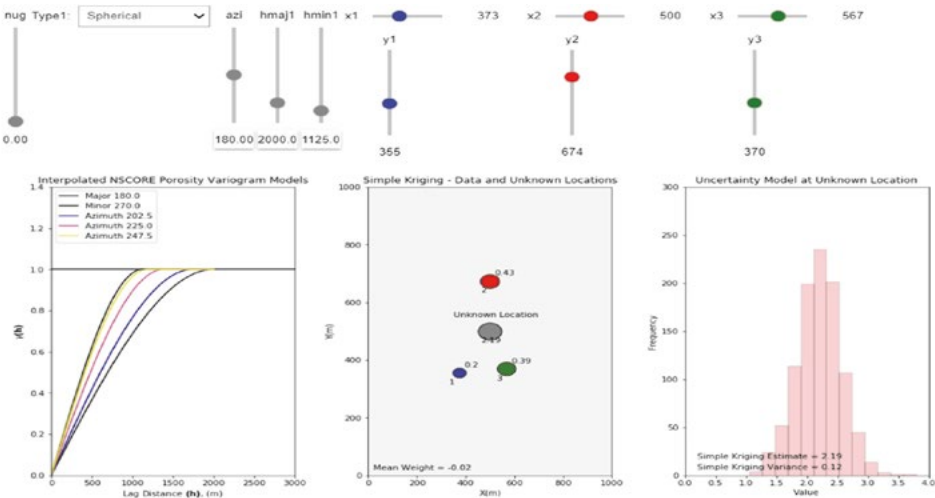


Fig. 2 Effect of the positions of data with the representation of lag distance (h) on the left, data on the middle, value of simple kriging estimate and variance on the right.

For the last case experiment, the question is: What is the impact on Kriging of changing the Nugget effect? Nugget effect represents short scale randomness or noise in the regionalized variable [15]. As seen in Fig. 3,

increasing the nugget effect to 0.60 the simple kriging variance (the effect of uncertainty) goes up (it is 0.77) and the weights goes down as 0.21, 0.23 and 0.20 respectively.

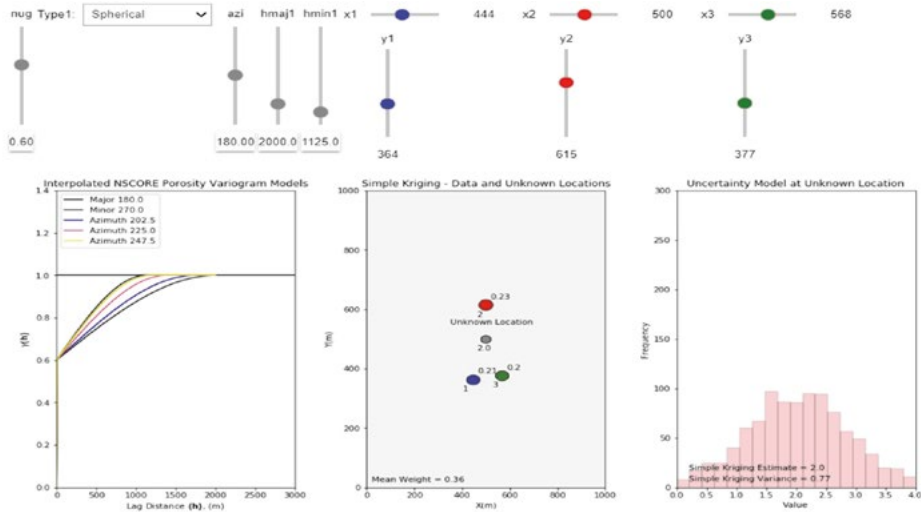


Fig. 3 60 % Nugget effect with the representation of lag distance (h) on the left, data on the middle, value of simple kriging estimate and variance on the right.

However, with the 100% nugget effect, it doesn't matter what the spatial structure was. It is all nugget effect and there is no correlation.

5 DISCUSSION

In this study an interactive simple kriging code [14] is implemented with a new small data and it is demonstrated with 3 different experiment cases to explore the behavior of kriging method. However, this method is good for small datasets with less parameters. It does not provide enough results for big and complex data. Therefore, it should be improved to become more reliable for big and complex data sets and combine with new analysis.

Acknowledgement

Financial support from the Internal Grants 2020 (Specifický vysokoškolský výzkum 2020) by Brno University of Technology under Project No. FAST-J-20-6285 is gratefully acknowledged.

References

- [1] Gayton N, Bourinet JM, Lemaire M. CQ2RS: a new statistical approach to the response surface method for reliability analysis. *Structural Safety*2003; 25(1): 99–121.
- [2] Ghanem RG, Spanos PD. *Stochastic finite elements: a spectral approach*. Berlin: Springer; 1991.
- [3] Sudret B, Der Kiureghian A. Comparison of finite element reliability methods. *Probabilistic Engineering Mechanics* 2002;17(4):337–48.
- [4] Blatman G, Sudret B. An adaptive algorithm to build up sparse polynomial chaos expansions for stochastic finite element analysis. *Probabilistic Engineering Mechanics* 2009;25(2):183–97.
- [5] Jones DR, Schonlau M, Welch WJ. Efficient global optimization of expensive black-box functions. *Journal of Global Optimization* 1998;13(4):455–92.
- [6] Wang G, Shan S. Review of metamodeling techniques in support of engineering design optimization. *J Mech Des* 2007;129(4):370–80.
- [7] Baldi Antognini A, Zagoraiou M. Exact optimal designs for computer experiments via Kriging meta modelling. *J Statist Plan Inference*2010; 140:2607–17.

-
- [8] Kaymaz I. Application of Kriging method to structural reliability problems. *Struct. Saf.* 2005; 27:133–51.
- [9] Lophaven S.N., Nielsen H.B., Sondergaard J., DACE-A MATLAB Kriging Toolbox, Technical University of Denmark, 2002.
- [10] Bichon BJ, Eldred MS, Swiler LP, Mahadevan S, McFarland JM. Efficient global reliability analysis for nonlinear implicit performance functions. *AIAA J*2008; 46:2459–68.
- [11] Sacks J, Welch WJ, Mitchell TJ, Wynn HP. Design and analysis of computer experiments. *Statist Sci* 1989; 4:409–23.
- [12] Kennedy MC, O’Hagan A. Bayesian calibration of computer models. *J R Statist Soc: Ser B (Statistical Methodology)* 2001; 63:425–64.
- [13] DiazDelaO F, Adhikari S. Gaussian process emulators for the stochastic finite element method. *International Journal Numerical Methodology Engineering* 2011; 87:521–40.
- [14] https://github.com/GeostatsGuy/PythonNumericalDemos/blob/master/Interactive_Simple_Kriging.ipynb (Access date: September 2020).
- [15] <http://www.geostatisticslessons.com/lessons/nuggeteffect> (Access date: December 2020)

TAYLOR SERIES EXPANSION FOR FUNCTIONS OF CORRELATED RANDOM VARIABLES

Lukáš Novák^{*1}

^{*}novak.l@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veverí 331/95, 602 00 Brno

Abstract

Semi-probabilistic approach in combination with non-linear finite element method is employed more frequently nowadays for design and assessment of structures. In that case, it is crucial to estimate statistical moments of structural resistance assuming uncertain input variables. The task is the estimation of statistical moments of function of random variables solved by finite element method. One of the solutions is represented by Taylor series expansion, which can be further used for the derivation of specific differencing schemes. The paper is focused on derivation of accurate differencing schemes for functions of correlated random variables. It is numerically shown, that the proposed differencing schemes are more accurate in comparison to standard scheme in case of strong correlation.

Key words

Taylor series expansion, statistical correlation, estimation of statistical moments, semi-probabilistic approach

1 INTRODUCTION

Mathematical modeling in civil engineering is often represented by the finite element method (FEM). Although FEM is an accurate and efficient technique, it is still highly time-consuming, particularly in the case of non-linear FEM including geometrical and material non-linearity. Therefore, from a practical point of view, it is necessary to decrease the number of FEM calculations as much as possible while satisfying the given safety requirements of the analysed structure. A solution can be represented by a semi-probabilistic approach widely accepted in the engineering field [1] and implemented into the national codes such as Eurocode [2]. Such approach is able to greatly reduce the number of necessary calculations for the design and an assessment of structures. The basic reliability concept is given as $Z = R - E$, where Z is a safety margin, which is defined as the difference between the structural resistance R and the load effect E . The task of reliability analysis is the estimation of failure probability $p_f = P(Z < 0)$, which might be highly computationally demanding. According to the semi-probabilistic approach, the resistance of a structure R is separated, and the design value R_d satisfying given safety requirements is evaluated instead of calculating the failure probability.

It is assumed that R and E are independent, and separated R is lognormally distributed and thus, the design value of resistance R_d is defined as

$$R_d = \mu_R \cdot \exp(-\alpha_R \beta v_R), \quad (1)$$

where v_R is the coefficient of variation (CoV) of resistance, β represents target reliability index and α_R represents the sensitivity factor associated with R derived from the First Order Reliability Method (FORM) [1,3]. For industrial applications, it is recommended to use $\alpha_R = 0.8$. Therefore, to determine the R_d by a semi-probabilistic approach, it is crucial to correctly estimate the mean value and variance of structural resistance R . This task may be challenging due to the fact that input random variables can generally be non-Gaussian and correlated. There have been several methods proposed in last two decades to estimate the variation coefficient of R (ECoV methods) [4], [5], [6], [7], [8]. However, mathematical background and limitations of these methods are often missing, and there is no solution for correlated random variables, which is common for material characteristics.

The only general approach to estimate statistical moments is pseudo-random sampling by a Monte Carlo type algorithm such as Crude Monte Carlo or Latin Hypercube Sampling [9,10]. However, it is necessary to perform a high number of simulations of the original mathematical model, which is not feasible in industrial applications due to the enormous computational burden. On the other hand, it is possible to assume several simplifications and create an approximation of the original mathematical model of R . The well-known approximation of functions is Taylor series expansion (TSE). Although TSE is often used to estimate statistical moments of functions of random

variables by mathematicians, it has not yet been well investigated in the context of non-linear FEM in civil engineering in order to adapt and directly use TSE for structural reliability and semi-probabilistic approach.

2 TAYLOR SERIES EXPANSION

Let (Ω, J, P) be a probability space, where Ω is an event space, J is Borel σ -algebra on Ω , and P is a probability measure $P: J \rightarrow (0, 1)$. Let us assume a random vector $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ consisting of random variables $X(\omega)$, $\omega \in \Omega$ with existing mean values $\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}$ and a mathematical function of this input random vector $r(\mathbf{X})$. The response of the mathematical model is thereafter a random variable R described by a specific probability distribution and statistical moments. Further, let us assume the mathematical model $r(\mathbf{X})$ to be infinitely differentiable in some open interval around the vector of mean values. Under this assumption, it is possible to expand the original model to the infinite Taylor series according to Taylor's theorem:

$$r(\mathbf{X}) = r(\boldsymbol{\mu}_X) + \nabla r(\boldsymbol{\mu}_X) \cdot (\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu}_X) + \frac{1}{2} (\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu}_X) \cdot \nabla \nabla r(\boldsymbol{\mu}_X) \cdot (\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu}_X) + \dots \quad (2)$$

Note that TSE consists of a constant term, linear term, quadratic term, etc. For a practical computation, it is crucial to reduce Taylor series to a finite number of terms and to obtain derivatives by accurate numerical differentiation. In the following subsections, the TSE is truncated to final number of terms and corresponding differencing schemes are proposed.

Linear truncation of TSE

Assuming linear terms of TSE, the mean value of R is simply $\mu_R \approx r(\mu_X)$ and the variance can be obtained as

$$\text{VAR}_R \approx \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial r(\mathbf{X})}{\partial X_i} \right)^2 \sigma_{X_i}^2 + \sum_{i,j=1, \dots, n, i \neq j} \rho_{i,j} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j} \frac{\partial r(\mathbf{X})}{\partial X_i} \frac{\partial r(\mathbf{X})}{\partial X_j}, \quad (3)$$

where σ_{X_i} is the standard deviation of i -th random variable and $\rho_{i,j}$ is the correlation coefficient between i -th and j -th random variable. One of the possible formulas for numerical derivation was proposed by Schlune et al. [8] using standard simple differencing adapted for structural engineering as follows:

$$\frac{\partial r(\mathbf{X})}{\partial X_i} = \frac{R_{X_m} - R_{X_{i\Delta}}}{\Delta X_i}, \quad (4)$$

where the response of mathematical model R_{X_m} is a result of calculation with mean values of \mathbf{X} and $R_{X_{i\Delta}}$ is the result of the model using reduced mean values of the i -th input random variables by ΔX_i . This differencing scheme is adapted for a structural design by the step-size parameter $c = (\alpha_R \beta)/2$, and $X_{i\Delta}$ thus corresponds to quantile $F_i^{-1}(\Phi(-c))$, where F_i^{-1} is an inverse cumulative distribution function of the i -th variable, and Φ is the cumulative distribution function of standardized Gaussian distribution. For the sake of clarity, the difference is calculated as $\Delta X_i = \mu_{X_i} - X_{i\Delta}$. Following this idea, additional asymmetric differencing schemes adapted for civil engineering can be derived as will be shown in following paragraphs.

In order to obtain higher accuracy of estimated derivatives, it is necessary to use additional calculation of the mathematical model. First order partial derivative can be estimated by backward differencing using three equally distanced points in following general form:

$$\frac{\partial r(\mathbf{X})}{\partial X_i} = A \cdot r(X_1, \dots, X_i - 2h, \dots, X_n) + B \cdot r(X_1, \dots, X_i - h, \dots, X_n) + C \cdot r(X_1, \dots, X_i, \dots, X_n), \quad (5)$$

where A, B, C are coefficients, which must be determined. Using TSE of all terms, one obtains:

$$\begin{aligned} & A \cdot r(\mathbf{X}) + A \frac{\partial r(\mathbf{X})}{\partial X_i} (-2h) + A \frac{1}{2} \frac{\partial^2 r(\mathbf{X})}{\partial X_i \partial X_i} (-2h)^2 + \dots \\ & + B \cdot r(\mathbf{X}) + B \frac{\partial r(\mathbf{X})}{\partial X_i} (-h) + B \frac{1}{2} \frac{\partial^2 r(\mathbf{X})}{\partial X_i \partial X_i} (-h)^2 + \dots \\ & + C \cdot r(\mathbf{X}). \end{aligned} \quad (6)$$

Since it is necessary to determine A, B, C such that summation of all terms results in cancelation of all $r(\mathbf{X})$, $\frac{\partial^2 r(\mathbf{X})}{\partial X_i \partial X_i}$ terms and results in the $\frac{\partial r(\mathbf{X})}{\partial X_i}$ coefficients summing to one, it requires to solve following equations:

$$\begin{aligned} A + B + C &= 0, \\ -2A \cdot h - B \cdot h &= 1 \rightarrow -2A - B = \frac{1}{h}, \\ 4A + B &= 0. \end{aligned} \tag{7}$$

Solution leads to coefficients $A = \frac{1}{2h}$, $B = \frac{-2}{h}$ and $C = \frac{3}{2h}$. Assuming differencing step adapted for civil engineering $2h = \Delta X_i$ as proposed by Schlune et al., one can finally derive following advanced differencing formula:

$$\frac{\partial r(\mathbf{X})}{\partial X_i} = \frac{3R_{X_m} - 4R_{X_i \frac{\Delta}{2}} + R_{X_i \Delta}}{\Delta X_i}. \tag{8}$$

The middle additional term $R_{X_i \frac{\Delta}{2}}$ is obtained by an evaluation of the original mathematical model with reduced i -th variable as $X_{i \frac{\Delta}{2}} = X_i - \frac{\Delta X_i}{2}$.

Quadratic truncation of TSE

If higher terms of TSE are considered, it is inefficient to derive analytical formulas for statistical moments, and thus mean and variance should be calculated numerically by simulation techniques directly from Eq. (2) truncated to quadratic terms. Moreover, additional higher-order derivatives must be evaluated, which might not be feasible in computationally demanding practical examples. Therefore, linear TSE is preferred for practical computations. However, for specific cases with significant interaction of input variables, one may use second-order TSE for the estimation of coefficient of variation. In this case, one can derive following differencing formula, similarly as in previous paragraphs, using already defined (calculated) simulations of the mathematical model:

$$\frac{\partial^2 r(\mathbf{X})}{\partial X_i \partial X_i} = \frac{R_{X_m} - 2R_{X_i \frac{\Delta}{2}} + R_{X_i \Delta}}{\Delta X_i^2}. \tag{9}$$

Moreover, it is necessary to calculate additional simulations for mixed partial derivatives. Using simple one-sided backward differencing, one can derive expression for mixed partial derivatives as follows:

$$\frac{\partial^2 r(\mathbf{X})}{\partial X_i \partial X_j} \approx \frac{\frac{\partial r(\mathbf{X})}{\partial X_j}(\mu_{X_i}, \mu_{X_j}) - \frac{\partial r(\mathbf{X})}{\partial X_j}(X_{i\Delta}, \mu_{X_j})}{\Delta X_i}, \tag{10}$$

where individual partial derivatives for defined coordinates are calculated as

$$\begin{aligned} \frac{\partial r(X)}{\partial X_j}(\mu_{X_i}, \mu_{X_j}) &\approx \frac{R_{X_m} - R_{X_j \Delta}}{\Delta X_j}, \\ \frac{\partial r(X)}{\partial X_j}(X_{i\Delta}, \mu_{X_j}) &\approx \frac{R_{X_{i\Delta}} - R_{X_{i\Delta} X_j \Delta}}{\Delta X_j}. \end{aligned} \tag{11}$$

Therefore, the final derivative scheme for mixed second order partial derivatives based on the simple backward differencing adapted for a structural design and assessment is proposed as

$$\frac{\partial^2 r(X)}{\partial X_i \partial X_j} = \frac{R_{X_m} - R_{X_{i\Delta}} - R_{X_j \Delta} + R_{X_{i\Delta} X_j \Delta}}{\Delta X_i \Delta X_j}, \tag{12}$$

As was shown, TSE can be constructed in various forms using different number of calculations. The differencing schemes described in this section and number of numerical calculations n_{sim} are summarized as:

- linear TSE with a simple differencing scheme using Eq. (4) – $n_{sim} = n + 1$,
- linear TSE with an advanced differencing scheme using Eq. (8) – $n_{sim} = 2n + 1$,

- TSE truncated to quadratic terms with a differencing scheme using Eq. (8) for the first-order derivatives, Eq. (9) for the second-order partial derivatives, and Eq. (12) for the mixed derivatives – $n_{sim} = 2n + \binom{n}{2} + 1$.

3 NUMERICAL EXAMPLE

The numerical example is motivated by the industrial applications in civil engineering often represented by non-linear finite element models, typically ultimate resistance given by the peak of the load-deflection curve of concrete structural element. The behaviour of such a physical system is often monotone with a slightly non-linear progress. A typical function solved by FEM can be found, for example, in [8], and due to the computational demands of FEM, its shape was replicated by the following artificial function:

$$R = r(\mathbf{X}) = X_1 X_2 - X_1^2 - \left(\frac{X_2^2}{30}\right) - (X_1 - 30)(X_2 - 200). \quad (9)$$

The presented variants of TSE are used for the estimation of variance and coefficient of variation (CoV). As can be seen, the estimation of variance and CoV by linear TSE with advanced differencing together with quadratic TSE is accurate. On the other hand, linear Taylor expansion with simple one-sided backward differencing showed a significant error in estimation for all correlation coefficients. The results on the right-hand side of Fig. 1 represent the pure influence of correlation, and as can be seen, the slope of the curve estimated by simple linear TSE was significantly different. Thus, this method is not able to correctly identify the role of correlation and the error of the estimation is higher with increasing correlation.

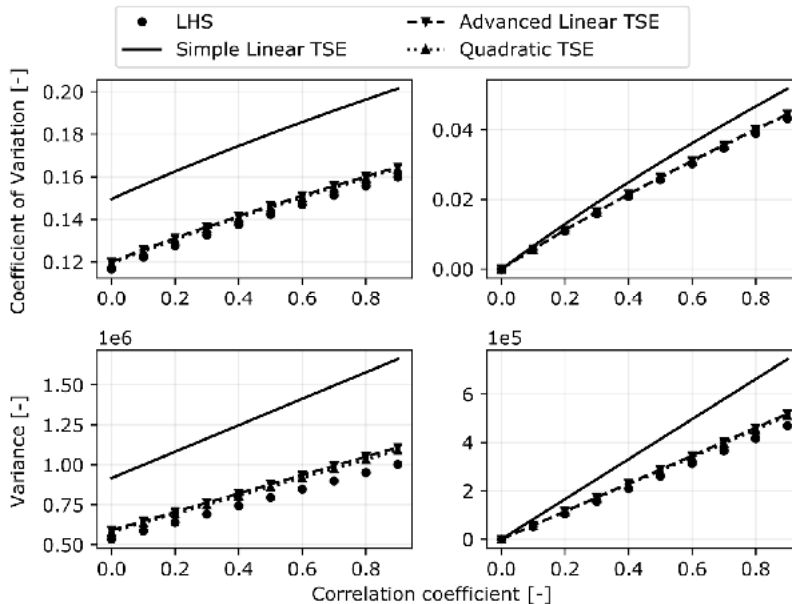


Fig. 1 Estimation of CoV (top) and variance (bottom) of the third example by the presented methods. Pure influence of correlation is obtained by subtraction of values for uncorrelated case (right).

4 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The TSE represents a powerful and accurate technique with a strong mathematical background. Although Schlune et al. proposed the ECoV method based on linear TSE with a simple asymmetric differencing, there are no studies on its limitations and possible generalizations via differencing schemes and a truncation order of an approximation.

Therefore, it was necessary to propose different variations of TSE for specific problems of structural assessment. The variations of TSE were proposed with attention to the reduction of computational cost as much as possible, since derivations are computed by finite differencing of FEM in industrial applications. Therefore, each additional level of the TSE works with the information previously obtained from calculations of the original mathematical model. It can be seen from the presented results, that linear TSE fails in the case of significantly non-linear functions. Moreover, the main motivation of this paper is dealing with correlation among random input variables, which has not been investigated yet in the context of structural design assessment. It is clear from the presented example that the linear TSE with simple differencing is not suitable for functions of correlated variables. However, once the differencing scheme according to Eq. (8) is used in combination with linear TSE, its accuracy is significantly improved. Thus, if there is not a strong interaction among input random variables, it is not necessary to use quadratic TSE, which leads to additional computational demands.

The non-linearity of functions and statistical correlation of input random variables represent crucial aspects in estimating statistical moments of industrial mathematical models. Unfortunately, the accuracy of standard existing methods is not satisfying for such models. Therefore, this paper presents an adapted TSE for estimation of the coefficient of variation for functions of correlated input random variables. Since mathematical models in civil engineering are often functions of correlated input random variables, it was necessary to develop new and efficient methods based on a semi-probabilistic approach widely accepted for the design and assessment of structures satisfying given safety requirements. The presented differencing schemes are based on the asymmetric quotient, which is typical for engineering applications, where one is interested in extreme structural behaviour leading to failure of structures, i.e. left tail of the probability distribution function. From the obtained numerical results, it is clear that it is necessary to choose advanced asymmetric differencing schemes in the cases of correlated input random variables or increase the truncation order of Taylor series expansion. It was shown that its accuracy is significantly higher in comparison to the commonly used linear TSE with simple differencing scheme.

Acknowledgement

This research was funded by the Czech Ministry of Education, Youth and Sports under project No. FAST-J-20-6417. The first author is Brno Ph.D. Talent Scholarship Holder - funded by the Brno City Municipality.

Resources

- [1] CORNELL, C. A. A Probability-Based Structural Code. ACI Journal Proceedings. 1969, 66(12). ISSN 0002-8061. Dostupné z: doi:10.14359/7446
- [2] EN 1990: Eurocode: Basis of Structural Design. Brussels, Belgium: Comité Européen de Normalisation, 2002.
- [3] HASOFER, A. M. and N. C. LIND. Exact and invariant second moment code format. Journal of the Engineering Mechanics Division of American Society of Civil Engineers. 1974, 100(EM1), 111–121.
- [4] PIMENTEL, Mário, Eugen BRÜHWILER and Joaquim FIGUEIRAS. Safety examination of existing concrete structures using the global resistance safety factor concept. Engineering Structures. 2014, 70, 130-143. ISSN 01410296.
- [5] CERVENKA, Vladimir. Reliability-based non-linear analysis according to fib Model Code 2010. Structural Concrete. 2013, 14(1), 19-28. ISSN 14644177. Dostupné z: doi:10.1002/suco.201200022
- [6] VAL, Dimitri, Fiodor BLJUGER and David YANKELEVSKY. Reliability evaluation in nonlinear analysis of reinforced concrete structures. Structural Safety. 1997, 19(2), 203-217. ISSN 01674730.
- [7] CERVENKA, Vladimir. Global Safety Format for Nonlinear Calculation of Reinforced Concrete. Beton- und Stahlbetonbau. 2008, 103(S1), 37-42. ISSN 00059900.
- [8] SCHLUNE, Hendrik, Mario PLOS and Kent GYLLTOFT. Safety formats for nonlinear analysis tested on concrete beams subjected to shear forces and bending moments. Engineering Structures. 2011, 33(8), 2350-2356. ISSN 01410296.
- [9] MCKAY, Michael D. Latin hypercube sampling as a tool in uncertainty analysis of computer models. In: Proceedings of the 24th conference on Winter simulation - WSC '92. New York, New York, USA: ACM Press, 1992, s. 557-564. ISBN 0780307984.
- [10] IMAN, Ronald L. a W.J. CONOVER. Small sample sensitivity analysis techniques for computer models.with an application to risk assessment. Communications in Statistics - Theory and Methods. 2007, 9(17), 1749-1842. ISSN 0361-0926. Dostupné z: doi:10.1080/03610928008827996

POROVNANIE ZJEDNODUŠENEJ A SPH METÓDY MODELOVANIA RÁZOVO ZAŤAŽENÝCH BETONOVÝCH KONŠTRUKCIÍ

A COMPARISON OF SIMPLIFIED AND SPH METHOD FOR MODELLING CONCRETE STRUCTURES EXPOSED TO IMPACT LOADS

Daniel Jindra^{*1}

*jindra.d@fce.vutbr.cz

¹Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Czech Republic

Abstrakt

Numerický prístup s využitím MKP bol použitý na popis chovania betónovej dosky zaťaženej rázovou vlnou od blízkeho výbuchu nálože malej hmotnosti. Bol vytvorený 3D numerický model a na výpočet bol použitý software s explicitným riešičom. Navzájom sú porovnané dva prístupy modelovania danej problematiky, zjednodušená metóda a tzv. SPH metóda. Sú uvažované viaceré prípady s rôznymi veľkosťami siete, resp. počtom SPH uzlov. Výsledky sú porovnávané s experimentálnymi dátami.

Kľúčové slová

Rázové zaťaženie, betónová konštrukcia, numerická analýza, MKP model, SPH metóda

Abstract

Numerical approach using the FEM has been used to describe the behaviour of concrete slab exposed to close range explosion of charge of lower mass. 3D numerical model has been created, and in order to conduct analyses, a software with explicit solver has been used. Two approaches in modelling of this phenomena are compared, the simplified method and SPH method (smooth particle hydrodynamics). Various cases with different mesh size, more precisely numbers of the SPH nodes, have been considered. The results are compared with experimental data.

Key words

Impact loading, concrete structure, numerical analysis, finite element model, SPH method

1 INTRODUCTION

Many structures are required to retain the resistance while exposed to extreme loading conditions, e.g. impacts of various objects, like air plane crash modelled by Králík [1], impacts of projectiles (defence structures for military purposes), or to withstand severe damage caused by pressure wave after explosion (gas explosion in civil structures, or different explosives). Various approaches in modelling the effects of blast load might be used to analyse the response of exposed structures.

The simplified approach, where the effect of the blast wave is considered as a time dependent pressure load applied at the exposed structure surface has been implemented in LS-Dyna [2], and is described as "load blast enhanced" (LBE).

Arbitrary Lagrangian Eulerian formulation (ALE) is the second approach, where the air and explosive materials itself are included in the background multi material ALE mesh (MMALE) [2]. The propagation of the blast pressure wave is being modelled. Construction is modelled by Lagrangian elements, the same as in the simplified approach, however a fluid structure interaction needs to be established [2], to provide a constrain between these two types of meshes.

Third method couples the previous two, LBE and ALE. In this case however, the ALE mesh is limited only to close structure surround, and the empirical blast pressure is applied on the exterior surface of the air domain which faces the blast - a layer of ambient elements [2]. The function of these ambient air elements is to convert the load pressure data into a thermodynamic state data, which are subsequently applied to the surrounding ALE air elements

as a source. Density and particle velocity are obtained from Rankine-Hugoniot relations [3]. Several comparative studies have been conducted, e.g. by Tabatabaei et al. [4], or Slavik [5], who compared mentioned methods.

A different approach is to model the blast using the smooth particle hydrodynamics (SPH) method, which was presented by Monaghan and Lucy independently in 1977 [6] [7]. Although originally introduced to simulate astrophysical phenomena, the method has been utilized in large variety of tasks, e.g. by Libersky [8] , who simulated high velocity impacts. Pramanik [9], Chen [10] and other researchers used SPH method for simulation of rock and soil explosions.

Schwer et al [11] or Trajkovski [12] modelled air blasts and compared SPH to previous methods, however structures of different material models or different materials at all have been considered. This paper presents a comparison of the simplified approach and the SPH method with various amounts of used SPH nodes and mesh sizes. The blast loads are applied on a concrete slab, and Johnson-Holmquist-Cook (JHC) [13] non-linear material model has been used to describe the mechanical behaviour of the structure exposed to 75 g of TNT explosive in a shape of cylinder located 9 cm from the upper slab surface. Material parameter values considered in this study are obtained from the parameter identification process of author's previous study [14].

2 NUMERICAL ANALYSES

Blast loading modelling approaches - Method #1: Simplified Blast Model (LBE)

The effect of a blast wave is considered as a time dependent pressure load, which is applied at the upper surface of the concrete slab, described as "load blast enhanced" (LBE) (LS-Dyna), and is based on the empirical blast loading function established by Randers-Pehrson and Bannister [15]:

$$P(t) = P_r(t) \cos^2 \theta + P_s(t)(1 + \cos^2 \theta - 2\cos \theta) \quad (1)$$

θ is the angle of incidence, $P_r(t)$ and $P_s(t)$ are time dependent reflected and incident overpressures respectively, both defined by Friedlander [16] equation, for case of $P_s(t)$ defined as:

$$P_s(t) = P_{so} \left(1 - \frac{t}{t_o}\right) \cdot e^{-b\frac{t}{t_o}} \quad (2)$$

P_{so} is the peak incident overpressure, b is a decay coefficient of the waveform, and t_o is the positive phase duration. These parameters are defined in dependence on scaled distance Z introduced by Hopkinson [17] and Cranz [18]:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (3)$$

R is the distance from the centre of blast, and W is the equivalent TNT mass. Parameter values in SI units are obtained from JRC report [19] The arrival time of the blast wave t_a is approx. 17 μ s.

Modelling approaches - Method #2: Smooth Particle Hydrodynamics (SPH)

The SPH method is a mesh-free (Lagrangian) solver originally developed for hydrodynamics. The governing equations of fluid dynamics are in form of partial differential equations, and are determined by interpolation from the particles. Discretized formulation derivation of the SPH method is divided into two steps.

In the first step called kernel approximation, the arbitrary function and its gradient are introduced in dependence on smoothing length h and smoothing kernel function W (adopted as cubic B-spline [2]):

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x')W(x - x', h)dx' \quad (4)$$

$$\langle \nabla f(x) \rangle = - \int_{\Omega} f(x')\nabla W(x - x', h)dx' \quad (5)$$

In the second step termed as particle approximation, the integral forms of the function and the function gradient are approximated by the summarization of the nearest particle values:

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N f(x_j)W_{ij} \frac{m_j}{\rho_j} \quad (6)$$

$$\langle \nabla f(x_i) \rangle = - \sum_{j=1}^N f(x_j) \nabla W_{ij} \frac{m_j}{\rho_j} \quad (7)$$

where m_j is mass and ρ_j is density. $W_{ij} = W(x_i - x_j, h)$.

For the explosive TNT material, Jones Wilkins Lee (JWL) Equation of State (EOS) [20] has been considered. The pressure is defined as a function of the internal energy per volume E , and the relative volume V . JWL EOS is defined as:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (8)$$

EOS parameters A , B , R_1 , R_2 , ω as well as TNT material parameters, as detonation velocity, density, Chapman-Jouguet Pressure (PCJ) and internal energy per unit reference volume $E0$ are based on reports [21] and [22].

Numerical models

Dimensions of concrete slab exposed to blast load are $500 \times 500 \times 60$ mm, material class C30. The reinforcement steel bars $\varnothing 6$ of axial distance 100 mm are situated in the mid height of the slab in both directions.

Geometry of the numerical model adopted for the FEM analysis in case of the simplified approach #1 (Fig. 1 right) is closely described in author's previous study [14], as well as the used values of JHC material model parameters, and the material model itself. In this case however, the mesh size of the hexahedral solid concrete elements of the concrete slab is 2.5 mm instead of 3 mm which has been used in [14].

In model approach #2, the SPH nodes to model the TNT explosive are aligned in a regular square grid with established distance between two neighbouring nodes (in the Fig.1 left, this grid size is 1 mm). Various grid sizes (and therefore amounts of SPH nodes) have been considered and compared in this study. For all the cases of grid sizes, only SPH nodes within 6 cm high cylinder located 9 cm from the upper slab surface are included. Each SHP grid is designed to have a SPH node exactly in its centre of gravity, where the blast epicentre is considered to be. The mass of each SPH node (for certain case of grid size) is the same, and is determined from the total number of modelled SPH nodes for the considered case of the grid size.

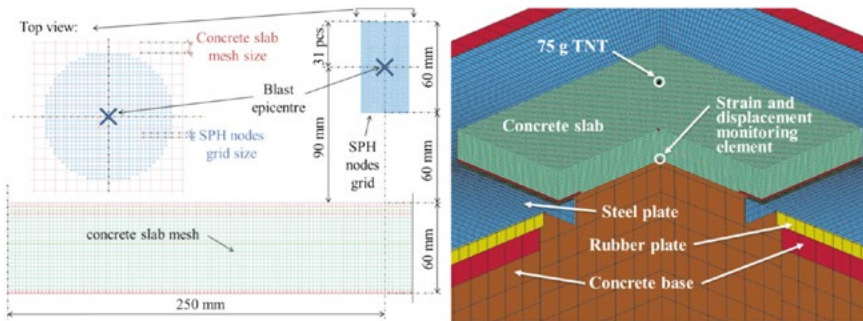


Fig. 1 Numerical model geometry; right: simplified method #1; left: SPH method #2, detail.

3 ANALYSES RESULTS

For the model cases of the approach #2 (SPH method), more variants with different time steps or different SPH nodes grid size (number of SPH nodes) have been considered (see the legend in Fig. 2 a). In cases #2a,b,c the 1 mm grid size has been adopted, and these cases differs in the time step size. Different SPH grid size has been considered for cases #2d and #2e. Case #1 are the results in accordance with the simplified approach.

The mid-span vertical displacement of the concrete slab in time are compared in the Fig. 2 a. Fig. 2 b depicts the mid-span strain at the bottom surface of the slab. For each case the depicted strain is in one of the directions perpendicular to the slab edge (and the same direction has been considered for all the cases). There might be a little difference between the strain in one or the other orthogonal direction, as observed for case #2d, where strains in both directions are depicted. The difference in the other cases of model approach #2 are not bigger, and in case of the simplified model approach (#1), the difference is negligible.

Bottom surface strain patterns in the matter of the first principal strain are depicted for the selected cases in Fig. 2 c - Fig. 2 e in certain point of the time.

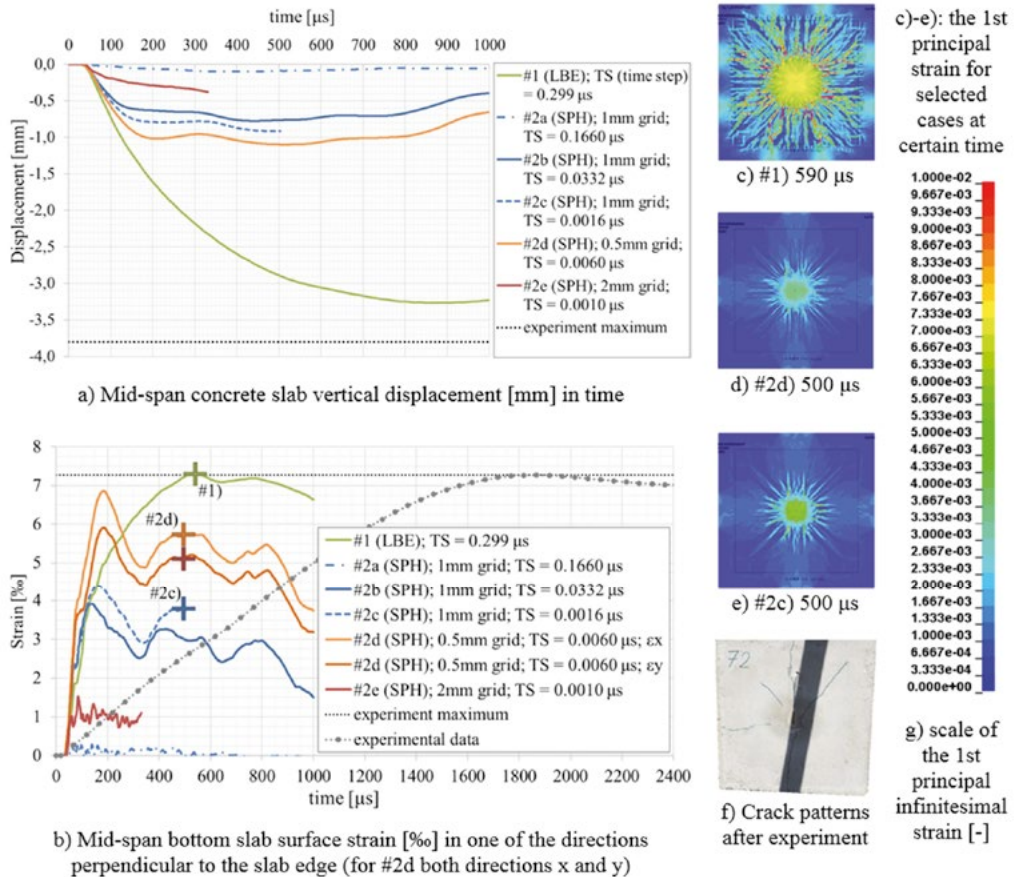


Fig. 2 Analyses results. Note: the times of principal strain plots (c - e) are depicted in the strain-time diagram (b).

4 DISCUSSION

Vertical mid-span displacements (Fig. 2 a) are significantly lower for all the model cases of the SPH approach (#2) then in case of the simplified approach (#1). Strain peak values (Fig. 2 b) in the mid-span of the bottom surface are close to the peak value of the simplified method, when finer SPH grid has been adopted (#2d). However overall strains at the bottom surface (Fig. 2 d) are lower than the results of the simplified approach. Peak value of the strain based on the experimental data has been however reached much later, and the slope of the strain-time curve of the experimental data set is also lower (lower strain rates).

The simplified blast model considers the spherical source of the explosion from a single point [2], with the validity range of scaled distance Z in interval $(0.147 ; 40) \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$. For the modelled case, scaled distance value of $0.213 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ is quite close to the limits. The simplified approach is only approximate [19], and the overall response is not excluded to be slightly different. Moreover, different authors have proposed various values of the JWL EOS parameters for TNT, as closely studied e.g. by Giam et al [23]. In this study only values based on the reports [21] and [22] have been considered.

In order to make the contact between SPH nodes and the upper slab surface working properly, the time step size needs to be reduced to achieve lower number of penetrating high-speed SPH particles through the structure. This is observed in cases #2a,b,c (with the SPH grid size of 1 mm). The detonation velocity of the TNT explosive is $6930 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [22]. The concrete slab mesh size is 2.5 mm. It would take $0.36 \mu\text{s}$ for a particle of this velocity to travel such a distance. The time step size needs to be intuitively lower in order to make the contact surface working. Time step value $0.166 \mu\text{s}$ (#2a) is not yet sufficient. A significant improvement is observed after decreasing the

time step size to 20% (#2b). Further lowering (#2c) however has not improved the response significantly, and is not useful in the matter of the computational time. The time step size influence has been so far investigated only considering 1 mm SPH grid size (and 2.5 mm concrete slab mesh size), with the TNT charge located exactly above the mid span of the slab.

Grid size (total number of the SPH node) has a significant impact on the results (Fig. 2 b). The results are not in a good match with the test data when a coarser grid has been adopted (#2e), even though the time step size was very little. Finer grid (#2d) needs to be adopted.

The crack patterns (Fig. 2 c, d, e) are overall in a nice match with the experimental data (Fig. 2 f). However in the model cases #2, the overall blast effects are less intense.

5 CONCLUSION

Finite element numerical analyses considering 2 different approaches have been conducted in order to study and compare the response of concrete structure exposed to impact load of the pressure wave after explosion. In order to obtain reasonable results, it is necessary to determine time step size, that is fine enough to capture the trajectory of the SPH nodes near the defined contact area. Also finer grid size (the number of SPH particles) needs to be adopted. When these recommendations are fulfilled, the SPH approach (#2) seems to work well, however is much more computational time consuming than the simplified blast approach (#1). The results of both approaches were in a nice match with experimental data considering the order of the values. However, a different TNT material parameters, addition of SPH particles of the ambient air, or little altering the position of the charge horizontally might have some influence on the results, that might be studied in the further research.

Acknowledgement

This paper has been created with the financial support of the project FAST-J-20-6256 provided by the Brno University of Technology fund for specific university research.

References

- [1] KRÁLÍK, J. (2014). Safety of nuclear power plant against the aircraft attack. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 617, p. 76 – 80. ISSN: 1662-7482. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.617.76.
- [2] Livermore Software Technology Corporation (1997), LS-Dyna® Theoretical Manual. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation.
- [3] KINNEY, G. F., and GRAHAM, K. J. (1985). *Explosive shocks in Air*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online ISBN: 978-3-642-86682-1, 1985. DOI: 10.1007/978-3-642-86682-1.
- [4] TABATABAEI, Z. S., and VOLZ J. S. (2012). A comparison between three different blast methods in LS-Dyna®: LBE, MM-ALE, Coupling of LBE and MM-ALE. Paper presented at the 12th International LS-Dyna® Users Conference, Detroit U.S. 2012.
- [5] SLAVIK, T. (2010). A coupling of empirical explosive blast loads to ALE air domains in Ls-Dyna®. Paper presented at the 7th European LS-Dyna® Conference, Salzburg Austria 2009.
- [6] GINGOLD R.A., MONAGHAN J.J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* vol. 181, is. 3, p. 375–389, ISSN (online): 1365-2966. DOI: 10.1093/MNRAS/181.3.375.
- [7] LUCY L.B. (1977). A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *The Astronomical Journal*, vol. 82, p. 1013–24. ISSN: 00046256. DOI: 10.1086/112164.
- [8] LIBERSKY L.D., Randles P.W., Carney T.C., Dickinson D.L. (1997). Recent improvements in SPH modeling of hypervelocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 20, is. 6–10, p. 525–532. ISSN: 0734-743X. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)87441-6.
- [9] PRAMANIK R., Deb D. Implementation of smoothed particle hydrodynamics for detonation of explosive with application to rock fragmentation. *Rock Mech Rock Eng* 2015; 48(4):1683.
- [10] CHEN, J.Y. and LIEN F.S. (2018). Simulations for soil explosion and its effects on structures using SPH method. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 112, p. 41-51. ISSN: 0734-743X. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.10.008.
- [11] SCHWER, L., HAILONG T., MHAMED S. (2015). LS-Dyna Air Blast Techniques: Comparisons with Experiments for Close-in Charges. Paper presented at the 10th European LS-Dyna® Conference, Würzburg Deutschland 2015.
- [12] TRAJKOVSKI J. (2017). Comparison of MM-ALE and SPH methods for modelling blast wave reflections of flat and shaped surfaces. Paper presented at the 11th European LS-Dyna® Conference,

- Salzburg Österreich 2017.
- [13] JOHNSON G. R. and HOLMQUIST T. J. (1992). A computational constitutive model for brittle materials subjected to large strains, high strain rates and high pressures. In *Shock wave and High-Strain-Rate Phenomena in Materials*, p. 1075-1081 edited by M.A. Meyers, L.E. Murr, and K.P. Staudhammer, New York: Marcel Dekker Inc., ISBN 0824785797.
- [14] JINDRA, D., HRADIL, P., and KALA, J. (2020). Optimal adjustment of FE model of concrete slab exposed to impact loading. *MATEC Web Conf.* vol. 313 article no. 00024 (2020). DOI: 10.1051/mateconf/202031300024.
- [15] RANDERS-PEHRSON, G., and BANNISTER, K.A. (1997). Airblast loading model for DYNA2D and DYNA3D. Army Research Laboratory, Rept. ARL-TR-1310, U.S., 1997.
- [16] FRIEDLANDER, F.G. (1946). The diffraction of sound pulses I. Diffraction by a semi-infinite plane. *Proceedings of the Royal Society A*. 1946. ISSN 0080-5630. DOI: 10.1098/rspa.1946.0046.
- [17] HOPKINSON, B., British Ordnance board minutes 13565, in: *The National Archives*, Kew, UK, 1915, pp.11.
- [18] CRANZ, C., *Lehrbuch der Ballistik. Erster Band. AusereBallistik*, Springer Verlag, Berlin (1925).
- [19] KARLOS V., and SOLOMOS, G., (2013). Calculation of blast loads for application to structural components. JRC Technical Reports, Report EUR 26456 EN, Luxembourg. ISSN 1831-9424. DOI: 10.2788/61866.
- [20] LEE, E., HORNING, J., and KURY J., (1968). Adiabatic expansion of high explosives detonation products. Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, Livermore, TID 4500-UCRL 50422.
- [21] LEE, E., FINGER M, and COLLINS, W. (1973). JWL equation of state coefficients for high explosives. Report UCID-16189, Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, Livermore, California. 1973.
- [22] DOBRATZ, B. M., and CRAWFORD, P.C. (1985). LLNL explosive handbook - properties of chemical explosives and explosive simulants, Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, Livermore, California, 1985.
- [23] GIAM, A., TOH, W. and TAN, V. B. C. (2020) Numerical Review of Jones-Wilkins-Lee Parameters for Trinitrotoluene Explosive in Free-Air Blast. *ASME. Journal of Applied Mechanics*. May 2020; 87(5): 051008. DOI: 10.1115/1.4046243.

POROVNÁNÍ SOUČiniteLE INTENZITY NAPĚTÍ (REŽIM I) V LINEÁRNÍ LOMOVÉ MECHANICE POMOCÍ FEM A XFEM

COMPARISON OF STRESS INTENSITY FACTOR (MODE I) IN LINEAR FRACTURE MECHANICS USING FEM AND XFEM

Michal Jedlička^{*,1}

*jedlicka.m@fce.vutbr.cz

¹Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, 602 00 Brno, Veverí 331/95, Česká republika

Abstrakt

V tomto článku se zabýváme součinitelem intenzity napětí v lineární lomové mechanice. V programu Abaqus byl vytvořen jednoduchý model. Byly porovnávány dvě varianty, a to řešení pomocí metody konečných prvků a rozšířené metody konečných prvků. Součinitel intenzity napětí se v obou těchto metodách dále využívá v kombinaci s některými dalšími kritérii, pomocí kterých se rozhoduje o vzniku a šíření trhlin.

Klíčová slova

Lineární lomová mechanika, metoda konečných prvků, rozšířená metoda konečných prvků, trhlina, součinitel intenzity napětí

Abstract

In this paper, we present the stress intensity factor in linear elastic fracture mechanics. A simple model was created in the program Abaqus. Two variants were compared, namely the solution using the finite element method and the extended finite element method. The stress intensity factor is further used in both of these methods in combination with some other criteria that are used to decide on the initiation and propagation of cracks.

Key words

Linear fracture mechanics, finite element method, extended finite element method, crack, stress intensity factor

1 LITERÁRNÍ PŘEHLED

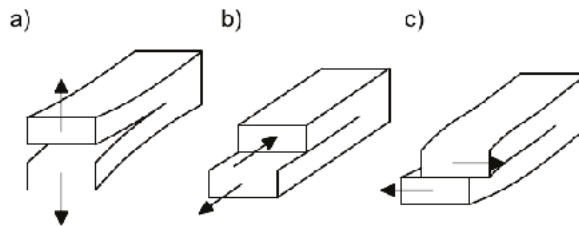
Metoda konečných prvků (FEM - finite element method) je jedním z nejběžnějších numerických nástrojů používaných v komerčních programech. Tato metoda se stala nejpopulárnějším a neúčinnějším analytickým nástrojem pro studium chování mnoha technických a fyzikálních problémů. FEM se také používá pro lomovou mechaniku. Modelování diskontinuit prostřednictvím sítě konečných prvků je však obtížné, kvůli změně topologie sítě. To se u těchto analýz projevilo jako velký problém, jelikož je potřeba generovat novou síť v každém kroku. Pro odstranění tohoto omezení se vyvinula rozšířená metoda konečných prvků (XFEM - extended finite element method), která umožňuje nespojitě řešení bez generování nové sítě. Řešení využívající obohacenou metodu konečných prvků bylo poprvé představeno v [1], kde tato metoda byla rozšířením konvenčního FEM, viz [2], kde bylo možné snadno obohatit funkce aproximace konečných prvků. Velký přehled teorie a aplikace XFEM je uveden v [3].

Aplikaci XFEM na lomovou mechaniku lze najít na několika příkladech. Kombinace XFEM s modelem kohezivní zóny může být použita ve [4], při studiu lomu betonových materiálů, která je se shodou numerických modelů a experimentů. Aplikace metody XFEM je rozšířena na studium „self-similar phenomena“ (podobných jevů), růstu trhlin [5]. Pro řešení zakřivených trhlin bylo vyvinuto nové obohacení prvku [6]. Pro simulaci kvazi-statického šíření trhlin v křehkých materiálech se používá numerická metoda [7]. Napětíový stav na vrcholu trhliny s konečnými deformacemi, který ukazuje, jak řešit problémy nelineární lomové mechaniky pomocí XFEM [8]. Obohacení funkcí kolem trhliny (diskontinuity) v XFEM zlepšuje [9]. V několika dalších článcích jsou hodnoty na vrcholu 2D trhliny řešeny pomocí doménových forem interakčních integrálů [10]. V [11] byla stanovena metoda nejmenších čtverců pro vyhodnocení faktoru intenzity stresu (SIF - stress intensity factor). Při řešení trhlin na

rozhraní bi-materiálů [12] je vyhodnocení SIF. [13] vyhodnotí přesnost stanovení SIF bez dalšího zpracování. Technika pro přímé hodnocení různých módů SIF v homogenních a bi-materiálech [14]. Modelování šíření trhlin v termoanisotropických elastických materiálech s použitím XFEM [15].

Lineární elastická lomová mechanika

Základem lomové mechaniky je zachycení chování, ke kterému dochází na vrcholu trhliny. Jeden přístup v této oblasti je teorie lineární elastické lomové mechaniky (LEFM - linear elastic fracture mechanics). V tomto přístupu je velký napěťový efekt na vrcholu trhliny aproximován jako ideální elastická trhlina s teoreticky nekonečným napětím na vrcholu. K popisu napětí na vrcholu trhliny v lineární lomové mechanice se využívá veličina zvaná součinitel intenzity napětí (SIF). Obecně se tato veličina značí K_I , K_{II} nebo K_{III} v závislosti způsobu namáhání trhliny viz Obr. 1 a je uvedena v jednotkách $Pa\sqrt{m}$. Pomocí čísla v dolním indexu rozlišujeme mód namáhání.

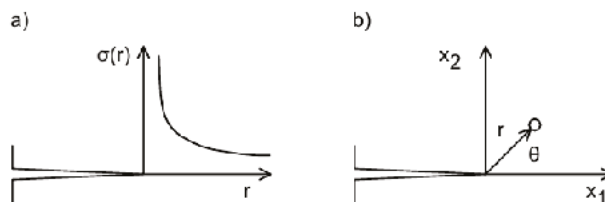


Obr. 1 Módy namáhání a) normálový, b) podélně smykový, c) příčně smykový.

Pole napětí v okolí vrcholu trhliny je popsáno členy tzv. Williamsovy řady [16].

$$\sigma = \frac{C_1}{\sqrt{r}} + C_2 + C_3\sqrt{r} + C_4r + \dots \quad (1)$$

Kde, členy C_n představují jednotlivé členy rozvoje, r je vzdálenost napětí od vrcholu trhliny.



Obr. 2 a) Napětí před vrcholem trhliny v polárních souřadnicích, b) kartézský a polární souřadnicový systém s počátkem systému ve vrcholu trhliny.

Po zanedbání vyšších členů nekonečné řady jsou výrazy pro popis pole napětí a posunutí tvořeny pouze prvním (singulárním) členem. Z tohoto předpokladu se napětí kolem vrcholu trhliny vypočítá podle vzorců:

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2r\pi}} f_{ij}^I(\theta) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2r\pi}} f_{ij}^{II}(\theta) + \frac{K_{III}}{\sqrt{2r\pi}} f_{ij}^{III}(\theta) \quad (2)$$

Kde, r a θ jsou polární souřadnice od napětí na vrcholu trhliny, K_α mód namáhání α , (α je I, II, III), f_{ij}^α definuje úhlovou odchylku napětí pro módy namáhání.

O tom, zda se trhlina bude šířit či nikoliv může být rozhodnuto podle více kritérií. Například Irwinovo lokální kritérium, které porovnává intenzity napětí K_I s jeho kritickou hodnotou K_c pomocí takzvané lomové houževnatosti. Ta je charakterizována podle použitého materiálu a popisuje odolnost proti šíření trhlin. Toto kritérium je vhodné pro mód poškození I, prvek není vždy namáhán pouze v tomto módu. Často se vyskytují módy II a III, a proto je nutné uvažovat o SIF v režimu smíšeného stresu. Dalším možným řešením je globální kritérium Griffitha, které porovnává hnací sílu trhliny s energií lomu. Pod názvem hnací síla si můžeme představit energii uvolněnou elastickou deformací na jednotku lomové plochy, je uvedena v jednotkách Jm^{-2} . Například hnací sílu lze určit pomocí J-integrálu nebo pomocí the virtual crack closure technique (VCCT).

2 PŘÍKLAD A VÝSLEDKY

Pro srovnání výsledků byl v programu Abaqus vytvořen jednoduchý model. Velikost tělesa je $10 * 5 * 0,4$ m a velikost sítě je $0,4$ m. Spodní plocha je podepřena ve všech směrech, horní plocha je zatížena plošným zatížením o velikosti 50 N/mm^2 . Materiál byl definován jako lineárně elastický s parametrem $E = 5000 \text{ N/mm}^2$ a $\nu = 0,3$. Trhlina je $2 * 0,4$ m a je umístěna uprostřed na kraji tělesa.

Hodnoty K_I a J_I byly vypočítány podle vzorců (3) a (5). Při výpočtu K_I jsou brány v úvahu dvě varianty. První varianta je, že $f\left(\frac{a}{w}\right) = 1$ a druhá varianta je podle vzorce (4). Hodnoty pro první variantu jsou $K_I = 125,3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ a $J_I = 2,857 \text{ MN/m}$ a druhá varianta $K_I = 138,1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ a $J_I = 3,471 \text{ MN/m}$.

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (3)$$

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = 1.122 - 0.231\left(\frac{a}{w}\right) + 10.55\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 21.71\left(\frac{a}{w}\right)^3 + 30.382\left(\frac{a}{w}\right)^4 \quad (4)$$

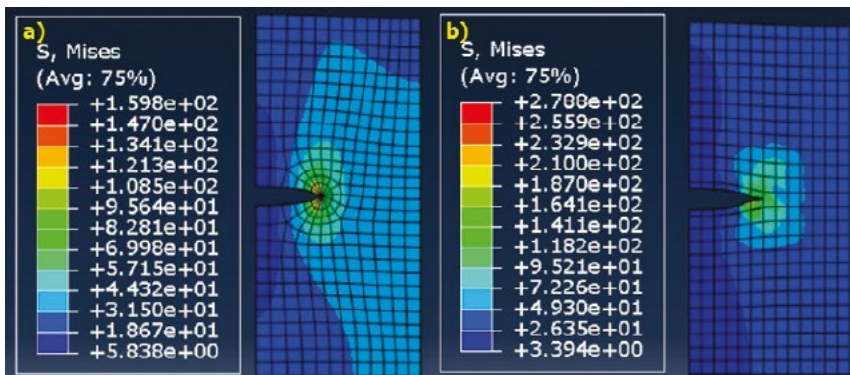
$$J_I = K_I^2 \left(\frac{1-\nu^2}{E}\right) \quad (5)$$

Tab. 1 Výsledky K_I a J_I a poměr veličin (FEM - XFEM)/XFEM *100 v %.

Model	Veličina	Kontura 1	Kontura 2	Kontura 3	Kontura 4	Kontura 5
FEM	K_I	119.8	126.3	126.1	125.5	125.2
	J_I	2.611	2.903	2.893	2.869	2.856
XFEM	K_I	129.4	134.0	129.9	129.1	132.6
	J_I	3.047	3.269	3.074	3.036	3.200
Poměr FEM/XFEM	K_I	-7.42	-5.75	-2.93	-2.79	-5.58
	J_I	-14.31	-11.20	-5.89	-5.50	-10.75

3 ZÁVĚR

Výsledky hodnoty K_I podle vzorce (3) jsou přibližně stejné a závisí pouze na správně zvolené tvarové funkci $f\left(\frac{a}{w}\right)$. Z výsledků Tab. 1 vidíme, že výsledky se u vybrané metody liší, ale v rámci jedné metody jsou výsledky přibližně stejné a významně se nemění prostřednictvím jednotlivých kontur. Hodnoty J_I závisí na hodnotě K_I podle vzorce (5). Hlavní výhodou metody XFEM je nezávislost sítě na trhlíně, což je vidět na Obr. 3. Na tomto obrázku jsou také zobrazeny výsledky napětí. Tyto výsledky jsou přibližně stejné, pouze u metody XFEM byl pod trhlinou lokální extrém, ale napětí na vrcholu trhliny jsou podobná.



Obr. 3 Výsledky napětí S_t Mises a) FEM model b) XFEM model.

Poděkování

Tato publikace byla podpořena z projektů Vysokého Učení Technického v Brně v rámci projektu č. FAST-J-20-6401.

Použité zdroje

- [1] BELYTŠCHKO, T. a T. BLACK, Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 45 (1999): Dostupné z: doi: [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(19990620\)45:5<601::AID-NME598>3.0.CO;2-S](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19990620)45:5<601::AID-NME598>3.0.CO;2-S)
- [2] MELENK, J.M., I. BABUŠKA, E. VERRON a B. BURGARDT. The partition of unity finite element method: Basic theory and applications. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1996, 139(1-4), 289-314. ISSN 00457825. Dostupné z: doi:10.1016/S0045-7825(96)01087-0
- [3] KHOEI, A.R. *Extended finite element method: theory and applications*. Chichester: John Wiley, 2015. Wiley series in computational mechanics. ISBN 978-1-118-45768-9.
- [4] WELLS, G. N., L. J. SLUYS, E. VERRON a B. BURGARDT. A new method for modelling cohesive cracks using finite elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2001, 50(12), 2667-2682. ISSN 0029-5981. Dostupné z: doi:10.1002/nme.143
- [5] MOËS, N., T. BELYTŠCHKO, E. VERRON a B. BURGARDT. Extended finite element method for cohesive crack growth. *Engineering Fracture Mechanics*. 2002, 69(7), 813-833. ISSN 00137944. Dostupné z: doi:10.1016/S0013-7944(01)00128-X
- [6] ZI, G., T. BELYTŠCHKO, E. VERRON a B. BURGARDT. New crack-tip elements for XFEM and applications to cohesive cracks. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2003, 57(15), 2221-2240. ISSN 0029-5981. Dostupné z: doi:10.1002/nme.849
- [7] MARIANI, S., U. PEREGO, E. VERRON a B. BURGARDT. Extended finite element method for quasi-brittle fracture. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2003, 58(1), 103-126. ISSN 0029-5981. Dostupné z: doi:10.1002/nme.761
- [8] LEGRAIN, G., N. MOËS, E. VERRON a B. BURGARDT. Stress analysis around crack tips in finite strain problems using the eXtended finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2005, 63(2), 290-314. ISSN 00295981. Dostupné z: doi:10.1002/nme.1291
- [9] BÉCHET, E., H. MINNEBO, N. MOËS a B. BURGARDT. Improved implementation and robustness study of the X-FEM for stress analysis around cracks. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2005, 64(8), 1033-1056. ISSN 0029-5981. Dostupné z: doi:10.1002/nme.1386
- [10] YAU, J. F., S. S. WANG, H. T. CORTEN a W.W. TWORZYDŁO. A Mixed-Mode Crack Analysis of Isotropic Solids Using Conservation Laws of Elasticity. *Journal of Applied Mechanics*. 1980, 47(2), 335-341. ISSN 0021-8936. Dostupné z: doi:10.1115/1.3153665
- [11] DUARTE, C.A., O.N. HAMZEH, T.J. LISZKA a W.W. TWORZYDŁO. A generalized finite element method for the simulation of three-dimensional dynamic crack propagation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2001, 190(15-17), 2227-2262. ISSN 00457825. Dostupné z: doi:10.1016/S0045-7825(00)00233-4
- [12] NAGASHIMA, T., Y. OMOTO a S. TANI. Stress intensity factor analysis of interface cracks using X-FEM. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2003, 56(8), 1151-1173. ISSN 0029-5981. Dostupné z: doi:10.1002/nme.604
- [13] XIAO, Q. Z., B. L. KARIHALOO a B. L. KARIHALOO. Direct evaluation of accurate coefficients of the linear elastic crack tip asymptotic field. 2003, 26(8), 719-729. ISSN 8756-758X. Dostupné z: doi:10.1046/j.1460-2695.2003.00648.x
- [14] LIU, X. Y., Q. Z. XIAO a B. L. KARIHALOO. XFEM for direct evaluation of mixed mode SIFs in homogeneous and bi-materials. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2004, 59(8), 1103-1118. ISSN 0029-5981. Dostupné z: doi:10.1002/nme.906
- [15] BOUHALA, L., A.MAKRADI a S. BELOUETTAR. Thermo-anisotropic crack propagation by XFEM. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2015, 103(12), 235-246. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2015.09.014
- [16] M. L. WILLIAMS. On the stress distribution at the base of a stationary crack. *Journal of Applied Mechanics*. 1957, 79, 109-114. ISSN 0021-8936.

POROVNÁNÍ MODELŮ TAHOVÉHO ZMĚKČENÍ PŘI NUMERICKÉ SIMULACI LOMOVÝCH ZKOUŠEK BETONOVÝCH TRÁMCŮ

THE COMPARISON OF TENSILE SOFTENING MODELS IN NUMERICAL SIMULATION OF FRACTURE TESTS OF CONCRETE BEAMS

Ing. Martin Lipowczan^{*1}, doc. Ing. David Lehký Ph.D.¹

^{*}lipowczan.m@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Článek prezentuje studii vlivu modelů tahového změkčení při numerické simulaci laboratorních lomových zkoušek betonových trámů s centrálním zářezem zkoušených v třibodovém ohybu. Srovnání je provedeno s využitím dvou sad různě velkých zkušebních vzorků, které mají nominální rozměry $400 \times 100 \times 100$ mm a $1200 \times 300 \times 100$ mm a hloubku zářezu 20 % z celkové výšky vzorku. Na základě získaných experimentálních odezev vzorků je provedena identifikace materiálových parametrů s využitím inverzní analýzy založené na umělé neuronové síti. Byla realizována numerická simulace s třemi různými variantami modelu tahového změkčení betonu – exponenciální dle Hordijka, bilineární a trilineární, s cílem co nejpřesněji vystihnout sestupnou větev zatěžovacího diagramu.

Klíčová slova

Inverzní analýza, identifikace parametrů, lomová zkouška, numerická simulace, model tahového změkčení

Abstract

The paper presents a study of the influence of tensile softening models in the numerical simulation of laboratory fracture tests of concrete beams tested in a three-point bending configuration. The comparison is made using two sets of test specimens having nominal dimensions of $400 \times 100 \times 100$ mm and $1200 \times 300 \times 100$ mm with a central notch depth of 20% of the total depth of the specimen. In order to identify material parameters, an inverse analysis based on artificial neural network was performed using experimental responses. Numerical simulation was performed with three different alternatives of the tensile softening model of concrete – exponential, bilinear and trilinear. The aim is to capture as accurately as possible the descending branch of the load vs. displacement diagram.

Key words

Inverse analysis, parameter identification, fracture test, numerical simulation, tensile softening model

1 ÚVOD

Předložený článek navazuje na předchozí numerické analýzy lomu betonových trámů různých velikostí [1]. Základním parametrem v lomové mechanice je lomová energie, která reprezentuje odolnost materiálu proti lomu – je definována jako množství energie potřebné pro celkové porušení tělesa, resp. materiálového bodu numerického modelu. Běžným postupem, jak stanovit její velikost, je přímé vyhodnocení experimentálně získaného zatěžovacího diagramu pomocí metody lomové práce [2]. Získané hodnoty jsou ovšem v jistě míře závislé na velikosti a tvaru zkušebního vzorku.

Druhou možností, jak získat lomovou energii a další lomově-mechanické parametry, je inverzní analýza založená na metodě umělých neuronových sítí (artificial neural network, ANN) v kombinaci s numerickou simulací zkoušky [3]. Metodika inverzní analýzy byla ve výchozí konfiguraci implementována do programu FraMePID-3PB [4], kde se používá pro identifikaci parametrů standardních betonů testovaných v třibodovém ohybu trámce s centrálním zářezem na vzorcích o nominální výšce 100 mm.

Vztah mezi otevřením trhliny a klesajícím napětím v trhlíně po dosažení pevnosti v tahu popisuje tzv. křivka tahového změkčení, která je spolu s hodnotami lomově-mechanických parametrů podstatná pro co nejpřesnější provedení numerické simulace lomové zkoušky. Existuje několik variant modelu tahového změkčení. Mezi běžně používané patří exponenciální dle Hordijka [5] či bilineární. Trhliny jsou při MKP numerické simulaci modelovány pomocí modelu pásu trhlín (Crack band model) [6] či modelu kohezivní trhliny (Cohesive crack model) [7].

Cílem článku je ukázat srovnání vybraných modelů tahového změkčení při numerické simulaci lomových testů betonových vzorků dvou velikostí s experimentálně získanými zatěžovacími diagramy. Hodnoty lomově-mechanických parametrů a parametrů modelu změkčení jsou získány využitím inverzní analýzy založené na metodě umělých neuronových sítí.

2 MODELY TAHOVÉHO ZMĚKČENÍ BETONU

Při lomu zkušebního kvazikřehkého tělesa dochází postupně k dosažení tahové pevnosti materiálu, což má za následek vznik a postupné šíření trhlín. Tento průběh je možné popsat různými modely tahového změkčení. Jedním z nich je funkce exponenciálního změkčení dle Hordijka, která je odvozena experimentálně:

$$\frac{\sigma}{f_t^{ef}} = \left\{ 1 + \left(c_1 \frac{w}{w_c} \right)^3 \right\} \exp \left(-c_2 \frac{w}{w_c} \right) - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) \quad (1)$$

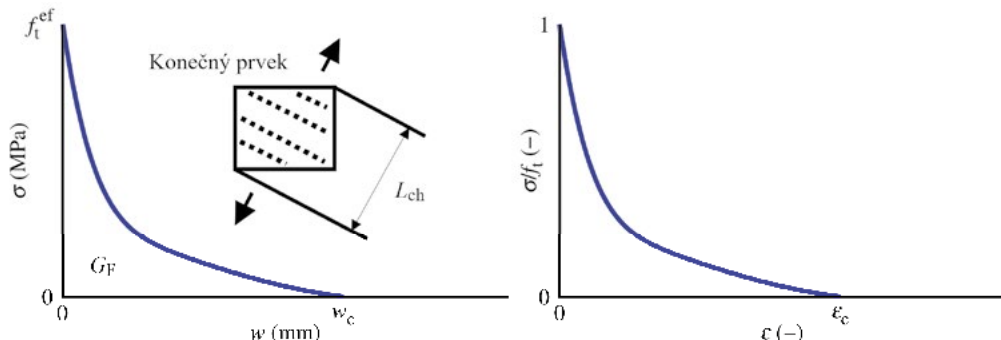
$$w_c = 5,14 \frac{G_F}{f_t^{ef}} \quad (2)$$

kde w je šířka otevřené trhliny, w_c je otevření trhliny po uvolnění veškerého napětí, G_F je lomová energie potřebná k vytvoření trhliny s nulovým napětím o jednotkové ploše, f_t^{ef} je efektivní tahová pevnost odvozená z funkce porušení, σ je normálové napětí v trhlíně, c_1 a c_2 jsou konstanty s hodnotou 3, resp. 6,93.

Funkce tahového změkčení je implementována do softwaru založených na metodě konečných prvků pomocí modelu pásu trhlín, čímž je zahrnut vliv velikosti prvků sítě:

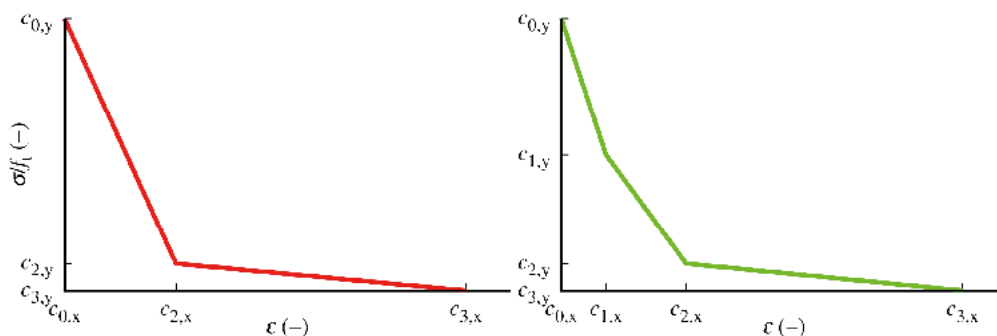
$$\varepsilon = \frac{w}{L_{ch}} \quad (3)$$

kde ε je poměrné přetvoření prvku a L_{ch} je charakteristická šířka pásu trhlín viz Obr. 1 (vlevo).



Obr. 1 Exponenciální funkce dle Hordijka pro otevření trhliny (vlevo), implementovaná exponenciální funkce změkčení do softwaru založeném na MKP (vpravo).

Ač je exponenciální funkce změkčení díky své jednoduchosti často při numerické simulaci používána, ne vždy dostatečně přesně vystihuje experimentálně změřenou odezvu. Nevýhodou této funkce je, že nelze příliš měnit její tvar, čímž by bylo možné dosáhnout zpřesnění numerické simulace. Z toho důvodu jsou zde testovány další varianty funkcí tahového změkčení. Jedná se o bilineární a trilineární modely, jak lze vidět na Obr. 2. Trilineární model má oproti bilineárnímu vložen jeden bod navíc s cílem zpřesnit oblast sestupné větve blízko za vrcholem zatěžovacího diagramu. Jedná se o bod c_1 , který má svíslou souřadnici fixně danou hodnotou $c_{1,y} = 0,5$. Některé souřadnice parametrů jsou rovněž pevně ukotveny: $c_{0,x} = 0$, $c_{0,y} = 1$ a $c_{3,y} = 0,001$. Zbývající souřadnice bodů obou modelů změkčení jsou volné, a tedy předmětem identifikace.

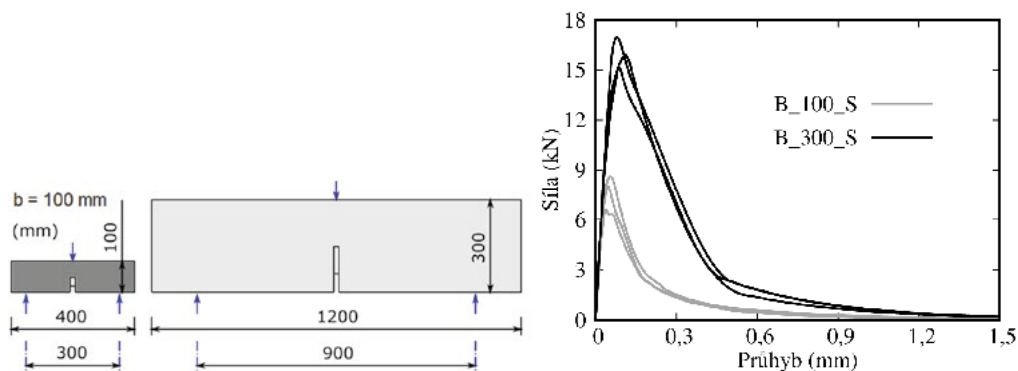


Obr. 2 Bilineární funkce tahového změkčení (vlevo), trilineární funkce tahového změkčení (vpravo).

3 STUDIE MODELŮ TAHOVÉHO ZMĚKČENÍ

Lomové experimenty

Pro studii vlivu tahového změkčení byly využity výsledky rozsáhlého experimentálního programu provedeného v laboratorích Ústavu stavebního zkušebnictví FAST VUT v Brně s cílem získání velikostně nezávislých hodnot lomově-mechanických parametrů [8]. V jeho rámci byly provedeny zkoušky třibodovým ohybem a štípacím testem zkušebních vzorků vyrobených z jednotné betonové směsi třídy C30/37. Maximální velikost zrna kameniva byla 16 mm. Během provádění testů bylo stáří betonových nosníků 100 dní. Článek představuje identifikaci materiálových parametrů na základě výsledků zkoušky třibodovým ohybem trámců s centrálním zářezem.



Obr. 3 Nejmenší a největší zkušební vzorky se zářezem S (vlevo), experimentální diagramy zatížení pro obě studované sady vzorků (vpravo).

Byly testovány tři různé velikosti vzorků v poměru 1:3. Každá velikost vzorků byla dále testována pro dvě různé startovací hloubky zářezů. Cílem experimentů bylo sledování vlivu velikosti vzorků s různými hloubkami zářezů. Pro účely článku byly vybrány vzorky nejmenších rozměrů ($400 \times 100 \times 100$ mm) s označením B_100_S a s největší velikostí ($1200 \times 300 \times 100$ mm) označené jako B_300_S, obě varianty se stejnou relativní hloubkou zářezu $a/D = 0,2$ (označení S), kde a je hloubka zářezu a D je celková výška vzorku (Obr. 3 vlevo). Analyzovány jsou 3 vzorky každé velikosti, přičemž pro každý vzorek byla získána odezva ve formě diagramu zatížení–průhyb uprostřed rozpětí (Obr. 3 vpravo).

Numerický model

Deterministický výpočtový model zkoušených vzorků byl vytvořen v MKP softwaru ATENA 2D [9]. Pro kvazikřehké materiály se běžně používá materiálový model 3D Non Linear Cementitious 2, který má v sobě zabudovanou funkci exponenciálního tahového změkčení dle Hordijka. Materiálový model 3D Non Linear

Cementitious 2 User umožňuje úpravu funkce tahového změkčení uživatelem, což je využito při aplikaci bilineárního a trilineárního modelu tahového změkčení.

Pro každou variantu/velikost vzorku byl vytvořen samostatný numerický model. Jedná se o prostý nosník s převislými konci, který je uložen na ocelových destičkách. Velikost prvků (hustota sítě) zůstává stejná pro všechny velikosti zkušebních vzorků. V místě šíření trhliny nad zářezem je ponechána konstantní velikost prvků, tzn. že charakteristická šířka pásu trhlin L_{ch} je stejná pro všechny velikosti vzorků a její velikost je 4 mm.

Stanovení lomově-mechanických parametrů

Identifikace hodnot materiálových parametrů betonu byla provedena s využitím inverzní analýzy založené na metodě umělých neuronových sítí. Byly studovány tři varianty tahového změkčení: exponenciální dle Hordijka, bilineární a trilineární. Cílem identifikace bylo získat pro každý testovaný vzorek odpovídající kombinaci hodnot lomových parametrů, které mají největší vliv na odezvu zkoušky tříbodovým ohybem – modul pružnosti E_c , tahovou pevnost f_t a lomovou energii G_F . Použitím materiálového modelu 3D Non Linear Cementitious 2 s exponenciální funkcí změkčení, je možno získat tyto parametry přímým způsobem. Při aplikaci bilineárního a trilineárního modelu změkčení jsou přímým způsobem stanoveny parametry E_c a f_t . Lomovou energii G_F je zapotřebí dopočítat na základě identifikovaných hodnot parametrů funkce změkčení. Hledanými parametry bilineární funkce změkčení jsou vodorovná a svislá souřadnice bodu c_2 a vodorovná souřadnice $c_{3,x}$. Pro trilineární model změkčení platí to stejně jako pro bilineární, jen s tím rozdílem, že je navíc identifikován parametr $c_{1,x}$.

Pro parametry, které jsou předmětem identifikace, se nejprve sestaví stochastický model, tedy definují se statistické momenty a příslušné pravděpodobnostní rozdělení. Stochastický model byl vytvořen v softwaru FReET [10]. Hledané parametry mají shodně rovnoměrné rozdělení, tedy jsou definovány rozsahem od a (minimum) po b (maximum). Simulační metodou LHS [11] bylo provedeno vzorkování náhodných veličin, počet simulací byl padesát. Opakovanou analýzou deterministického výpočtového modelu jsou získány náhodné odezvy. Náhodné realizace hledaných parametrů a k nim příslušné náhodné odezvy vzorků jsou následně použity při sestavení učicí množiny pro umělou neuronovou síť.

V následujícím kroku se vytvoří struktura sítě a poté probíhá její učení. Ve variantě s exponenciální funkcí změkčení je uvažováno pro obě velikosti betonových trámů na vstupu sítě se třemi parametry odezvy: síla $F_{0,01}$ při deformaci 0,01 mm (lineární oblast), maximální síla F_{max} (vrchol) a lomová práce $W_{0,6}$, což je celková plocha pod křivkou zatěžovacího diagramu až do deformace 0,6 mm. Varianty s bilineárním a trilineárním tahovým změkčením mají na vstupu sítě šest parametrů odezvy. Tři předchozí zmíněné parametry u varianty s exponenciálním změkčením jsou doplněny o další parametry odezvy: síla $F_{0,3}$ při deformaci 0,3 mm a síla $F_{0,5}$ při deformaci 0,5 mm. Posledním parametrem odezvy je síla $F_{0,1}$ při deformaci 0,1 mm u menších vzorků, pro větší vzorky je uvažována síla $F_{0,2}$ při deformaci 0,2 mm. Pro každou sadu vzorků je tato deformace určena zvlášť, přičemž se jedná o průměrnou hodnotu dvojnásobku deformace v místě maximální síly.

Naučená síť, která s dostatečnou přesností aproximuje inverzní funkci, slouží následně ke stanovení hledaných materiálových parametrů jednotlivých zkušebních vzorků. Ověření přijatelné přesnosti aproximace inverzní funkce je provedeno pomocí testovací množiny, kterou tvoří několik vybraných uspořádaných dvojic z učicí množiny.

4 VÝSLEDKY

Odpovídající parametry odezvy pro každou variantu tahového změkčení byly předloženy síti, ze které byly následně získány hledané parametry. Proces stanovení hledaných parametrů byl opakován u všech 6 vzorků. Výsledné průměrné hodnoty materiálových parametrů obou studovaných sad vzorků jsou uvedeny v Tab. 1. Rovněž bylo sledováno kritérium shody mezi křivkami získanými experimentálně a numerickou simulací. Jedná se o střední absolutní procentuální chybu (MAPE), kdy jsou porovnávány rozdíly mezi jednotlivými silami při konstantním přírůstku deformace, a to přes celý zatěžovací diagram až do deformace 0,6 mm:

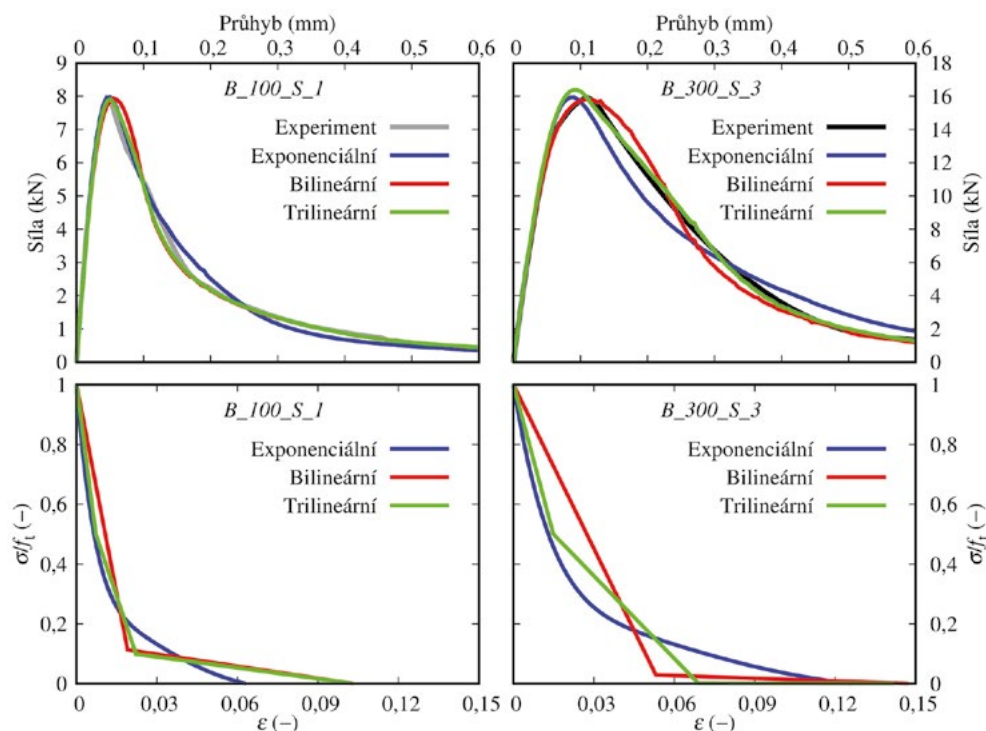
$$MAPE_{0,6} = \frac{100\%}{n} \sum_{d=1}^n \left| \frac{F_{e,d} - F_{s,d}}{F_{e,d}} \right| \quad (4)$$

kde n je počet bodů zatěžovacího diagramu (v tomto případě 120), $F_{e,d}$ je síla při dané deformaci získána experimentálně a $F_{s,d}$ je síla při dané deformaci získána numerickou simulací.

Tab. 1 Střední hodnoty identifikovaných materiálových parametrů a kritéria shody křivek (v závorce je uveden variační koeficient v %).

	B_100_S			B_300_S		
	Exponenciální	Bilineární	Trilineární	Exponenciální	Bilineární	Trilineární
E_c	33,6	33,9	33,8	40,6	41,1	40,9
[GPa]	(5,4)	(6,1)	(6,5)	(2,9)	(3,4)	(2,5)
f_t	3,24	2,74	2,93	2,31	1,84	2,22
[MPa]	(19,3)	(18,1)	(19,2)	(8,9)	(9,4)	(9,0)
G_F	182,5	187,4	190,5	236,0	227,1	226,5
[MN/m]	(8,7)	(7,5)	(9,5)	(4,9)	(6,4)	(5,3)
$MAPE_{0,6}$	11,6	5,5	3,9	16,8	7,7	4,7
[%]	(21,3)	(33,4)	(30,7)	(19,3)	(20,3)	(16,2)

Z obou sad vzorků byl vybrán jeden vzorek pro grafické srovnání a jeho identifikované hodnoty parametrů byly dosazeny zpětně do výpočtového modelu. Zatěžovací diagramy ze simulací výpočtového modelu jsou porovnány s laboratorními výsledky na Obr. 4. Vlevo nahoře jsou srovnány odezvy pro vzorek výšky 100 mm, vpravo nahoře pro vzorek výšky 300 mm. V dolní řadě lze vidět odpovídající tvary tahových změkčení, které byly použity při numerické simulaci.



Obr. 4 Porovnání zatěžovacích diagramů získaných z laboratorních zkoušek a simulací numerického modelu s identifikovanými hodnotami parametrů vybraných vzorků (horní řada), srovnání tvarů funkcí tahového změkčení všech studovaných variant (dolní řada).

5 DISKUZE

Z porovnání zatěžovacích diagramů obou vzorků získaných z laboratorních zkoušek a simulací výpočtového modelu s příslušnými identifikovanými hodnotami je patrné, že nejpřesnějšího vystižení tvaru křivky je dosaženo při použití trilineárního modelu změkčení. Vizualní srovnání je také doplněno o statistické kritérium shody –

střední absolutní procentuální chybu. Z něj vyplývá, že chyba mezi experimentálně a numericky získanými zatěžovacími diagramy při použití exponenciálního modelu změkčení dle Hordijka dosahuje průměrných hodnot v rozmezí od 11,6 % do 16,8 %. Při užití bilineárního tahového změkčení rozdíl mezi křivkami klesá na 5,5 % až 7,7 % a u trilineárního na 3,9 % až 4,7 %. Nejlépe se tak dle zmíněného kritéria shody jeví použití trilineárního tahového změkčení.

Získané hodnoty modulu pružnosti E_c , jsou u všech variant modelů změkčení takřka shodné. Tahová pevnost f_t při použití bilineárního modelu je výrazně nižší oproti hodnotám při užití exponenciálního modelu změkčení. U dosažených hodnot s trilineárním změkčením není pokles hodnot tahové pevnosti tak výrazný. Lomová energie G_F u vzorků B_100_S je mírně vyšší u bilineárního a trilineárního změkčení než u exponenciálního. Naopak u vzorků B_300_S nastává menší pokles.

6 ZÁVĚR

V článku bylo uvedeno porovnání výsledků identifikace lomově-mechanických parametrů betonových trámů dvou velikostí s centrálním zářezem zkoušených v třibodovém ohybu. Při provedení numerické simulace byly uvažovány tři varianty tahového změkčení: exponenciální dle Hordijka, bilineární a trilineární. Z vizuálního i statistického srovnání mezi experimentálně a numerickou simulací dosažených zatěžovacích diagramů vyplývá, že nejhodnější variantou pro identifikaci parametrů nezávisle na velikosti vzorků se jeví trilineární model změkčení. Možnou další variantou modelu změkčení by mohla být funkce multilineární, která by měla fixně stanovené všechny souřadnice bodů na ose y a naopak jejich souřadnice na ose x by byly volné, přičemž by byl zachován počet hledaných parametrů jako u modelu trilineárního.

Poděkování

Autoři děkují za podporu poskytnutou z projektu Grantové agentury České republiky (GAČR) MUFRAŠ č. 19-09491S a projektu juniorského specifického vysokoškolského výzkumu Vysokého učení technického v Brně registrovanému pod č. FAST-J-20-6413. Zvláštní poděkování patří Ing. Oldřichovi Žaludovi za přípravu betonové směsi, Ing. Barbaře Kucharczykové, Ph.D. a Ing. Petru Daňkovi, Ph.D. za provedení lomových testů a Ing. Haně Šimonové, Ph.D. za vyhodnocení lomových testů.

Použité zdroje

- [1] LIPOWCZAN, M., LEHKÝ, D. Numerická simulace lomových zkoušek vzorků různých velikostí. Sborník příspěvků konference JUNIORSTAV 2020. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2020. s. 483–487.
- [2] RILEM TC-50 FM, Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, Mater. Struct. 18, 107 (1985), 287–90.
- [3] NOVÁK, D., LEHKÝ, D. 2006. ANN inverse analysis based on stochastic small-sample training set simulation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 19, 731–740.
- [4] LEHKÝ, D., KERŠNER, Z., NOVÁK, D. FraMePID-3PB Software for Material Parameters Identification Using Fracture Test and Inverse Analysis. *Advances in Engineering Software*, Vol. 72, 2014, pp. 147–154. ISSN: 0965-9978.
- [5] HORDIJK, D.A. Local approach to fatigue of concrete. PhD Thesis, Technische Universiteit Delft, Delft, Nederlands, 1991.
- [6] BAŽANT, Z.P., OH, B.H. Crack band theory for fracture of concrete, Mater. Struct. 16, 3 (1983), 155–77.
- [7] HILLERBORG, A., MODÉER, M., PETERSSON, P.E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, Cem Concr. Res. 6, 6 (1976), 773–82.
- [8] LEHKÝ, D., KUCHARCZYKOVÁ, B., ŠIMONOVÁ, H., DANĚK, P. (2020). Comprehensive fracture tests of concrete for the determination of mechanical fracture parameters. *Structural Concrete* (v tisku).
- [9] ČERVENKA, V., JENDELE, L., ČERVENKA, J. ATENA program documentation – Part 1: theory. Cervenka Consulting, Prague, Czech Republic, 2016.
- [10] NOVÁK, D., VOŘECHOVSKÝ, M., RUSINA, R. 2012. FReET – Program Documentation: User's and Theory Guides, Version 1.5, Brno/Červenka Consulting, Česká republika, <http://www.freet.cz>.
- [11] MCKAY, M. D., BECKMAN, R. J., CONOVER, W. J. (1979). A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics*, Vol. 21, No. 2, 239–245.

VLIV VÝROBNÍCH TOLERANCÍ ZKUŠEBNÍHO TĚLESA NA HODNOTU INICIAČNÍ SÍLY

THE INFLUENCE OF DIMENSIONAL TOLERANCES OF TEST SPECIMEN ON ESTIMATION OF INITIAL FORCE VALUE

Michal Vyhliďal^{*1}, Jan Klusák²

^{*}Michal.Vyhliďal@vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

²Akademie věd České republiky, v. v. i., Ústav fyziky materiálů, Źiřkova 513/22, 616 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

Príspevek se zabývá analýzou vlivu výrobních tolerancí zkušebního tělesa na odhad hodnoty iniciační síly, při které se trhlinka začne ze zářezu šířit materiálem. Výrobní tolerance jsou analyzovány u speciálních těles o rozměrech 40 × 40 × 160 mm s dutinou 8 × 8 × 40 mm umístěnou uprostřed rozpětí, která byla opatřena zářezem a zkušena v konfiguraci třibodového ohybu. Cílem práce bylo analyzovat vliv tloušťky zářezu, polohy dutiny a polohy zářezu na hodnotu iniciační síly za pomoci metody konečných prvků ve spojení s kritériem maximálního tangenciálního napětí. Výsledky podrobné numerické analýzy ukazují, že největší vliv na hodnotu iniciační síly má poloha dutiny a zářezu, včetně jejich vzájemné polohy, zatímco tloušťka zářezu nemá téměř žádný vliv.

Klíčová slova

Lomová mechanika, metoda konečných prvků, střední hodnota tangenciálního napětí, výrobní tolerance

Abstract

In this work, the influence of dimensional tolerances on the estimation of the initial force value, under which new crack initiates in the edge notch, is investigated. The dimensional tolerances of special specimens of the nominal dimension 40 × 40 × 160 mm with internal cavity of 8 × 8 × 40 mm placed in the middle of the span, which were provided by initial central edge notch and tested in a three-point bending configuration, are analysed. The aim of this work was to analyse the influence of the notch width, position of the cavity and position of the notch on the value of the initial force value by means of finite element method in connection with the maximum tangential stress criterion. The results of a detailed numerical analysis indicate that the position of the cavity and the notch have the highest influence on the initial force value, while the notch width has almost no effect.

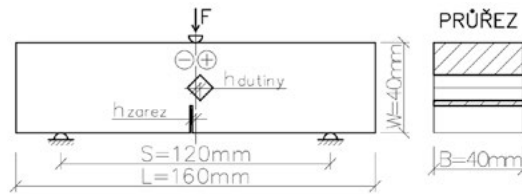
Key words

Fracture Mechanics, Finite Element Method, average tangential stress, dimensional tolerances

1 ÚVOD

Při návrhu či posouzení stávajících konstrukcí/dílčů je běžné hledat nejnepříznivější stav, který v konstrukci/dílci způsobí extrémní namáhání. Nicméně v mnoha případech se nebere v potaz, že skutečná geometrie může být od navrhované/projektované geometrie značně odlišná z důvodu výrobních tolerancí. Pro velké stavební konstrukce (např. mostní objekt či tunel) nebudou tyto tolerance hrát významnou roli. V případě malých prvků (např. zkušebních těles) ovšem může dojít vlivem zanedbání těchto tolerancí ke značnému zkreslení výsledků a tím i, v případě zkušebních těles, k nesprávnému stanovení lomově-mechanických vlastností materiálu, které jsou poté použity pro návrh stavební konstrukce.

Předmětem tohoto příspěvku je numerická analýza vlivu výrobních tolerancí na lomové chování speciálních těles o rozměrech 40 × 40 × 160 mm s dvěma koncentrátoři napětí – dutinou o rozměrech 8 × 8 × 40 mm a zářezem délky $a_0=12$ mm [1]. Konkrétně je v tomto příspěvku studován vliv tloušťky zářezu, polohy dutiny h_{dutiny} , polohy zářezu h_{zarez} a jejich vzájemné polohy na hodnotu iniciační síly F_{ini} , při které se trhlinka začne ze zářezu šířit materiálem. Polohy, ať již dutiny či zářezu, jsou vztaženy k ose příločky, na kterou je aplikováno zatížení (viz Obr. 1). Otázkou, kterou se tento příspěvek zabývá, je, jak a zdali vůbec tyto parametry ovlivňují hodnotu F_{ini} .



Obr. 1 Schéma zkušební vzorku.

2 TEORETICKÉ POZADÍ

Lomová mechanika

Lomová mechanika jako vědní obor nabízí účinné nástroje pro popis mechanismů a procesů porušování. Principy lomové mechaniky jsou postaveny na předpokladu, že koncentrátor napětí, který v tělese/konstrukci vyvolává změnu napětěového stavu, je ve formě trhliny [2]. Je-li tato podmínka v platnosti, pak dle lineární elastické lomové mechaniky (LELM) je možné pole napětí v blízkém okolí vrcholu trhliny popsat pomocí Williamsovy řady [2], [3], jejíž první singulární člen má exponent singularity napětí $p=1/2$. Ve skutečnosti je ovšem trhlina ve zkušebních tělesech simulována zářezem, který je po zatvrdnutí vzorku vytvořen diamantovou pilou nebo vodním paprskem, nebo vložením ostrého klínu do formy během plnění a jeho následném odstranění po zatuhnutí a zatvrdnutí vzorku. Z výše uvedeného je zřejmé, že ani jeden z těchto postupů nevytvoří v tělese ostrou trhlinu, ale vytvoří dva vruby. U vrubů již nelze, z důvodu rozdílného exponentu singularity napětí $p \neq 1/2$, využít principů LELM, ale je nutné aplikovat principy zobecněné lineární elastické lomové mechaniky [4], [5], [6]. Nicméně je nutné podotknout, že tyto principy jsou přesné pro křehké materiály, zatímco u kvazikřehkých materiálů, mezi které patří cementové kompozity, jsou její principy pouze přibližné.

Zobecněná lineární elastická lomová mechanika

Zobecněná lineární elastická lomová mechanika [4], [5], [6] se zabývá studiem pole napětí v blízkém okolí obecných koncentrátorů napětí. Složky tenzoru napětí jsou v blízkém okolí obecného koncentrátoru napětí závislé na exponentu singularity napětí p dle následujícího vztahu (1):

$$\sigma_{ij} \approx \frac{1}{r^p} \quad \text{pro } r \rightarrow 0 \quad (1)$$

kde σ_{ij} je složka tenzoru napětí a r je polární souřadnice s počátkem ve vrcholu trhliny.

Pro stanovení exponentu singularity napětí je využívána stěnová rovnice [9] definovaná v polární souřadném systému (2).

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \right) = 0 \quad (2)$$

kde Φ je Airyho funkce napětí v polárních souřadnicích (3) a θ je polární souřadnice.

Airyho funkce napětí Φ_m , kde m odpovídá jednotlivým materiálům, je zapsána ve tvaru nekonečné řady odpovídající rozvoji dle Williamse (3) [3]:

$$\Phi_m = \sum_{k=1}^{\infty} A_k r^{\lambda_k+1} F_{k,m}(\theta, \lambda_k) \quad (3)$$

kde A_k jsou neznámé konstanty, λ_k vlastní čísla a $F_{k,m}$ vlastní funkce úhlu θ a vlastního čísla λ_k .

Dosažením (3) do (2) dostaneme diferenciální rovnici 4. řádu pro výpočet vlastních funkcí $F_{k,m}$. Řešením rovnice jsou dva komplexně konjugované kořeny, které lze vyjádřit jako sumu dvou goniometrických funkcí \sin a \cos s konstantami a_m, b_m, c_m, d_m . Zavedením okrajových podmínek charakterizujících volné lince trhliny a dokonalou soudržnost mezi materiály, tzn. složky pole posunů a pole napětí jsou si na rozhraní rovny, dostaneme soustavu lineárních rovnic (4) [4], [5], [6]:

$$\mathbf{B}(\lambda)\mathbf{x} = 0 \quad (4)$$

kde $\mathbf{B}(\lambda)$ je matice systému a \mathbf{x} je vektor neznámých koeficientů.

Poslední neznámý parametr, vlastní číslo λ , je vyčíslen z podmínky netriviálního řešení:

$$\det \mathbf{B}(\lambda) = 0 \quad (5)$$

Pro běžné inženýrské výpočty je ovšem takový postup složitý, a proto od něj bude v dalším textu upuštěno. V našem příspěvku budou pole napětí zjištěna za pomoci dnes běžně používané metody konečných prvků (MKP) a stabilitní kritérium, které rozhoduje o iniciaci trhliny, bude založeno na střední hodnotě tangenciálního napětí před čelem zářezu.

Kritérium maximálního tangenciálního napětí

Kritérium je založeno na monitoringu střední hodnoty tangenciálního napětí okolo obecného koncentrátoru napětí (6) [4], [5], [6], [7], [8]:

$$\bar{\sigma}_{\theta\theta}(\theta) = \frac{1}{d} \int_0^d \sigma_{\theta\theta}(r, \theta) dr \quad (6)$$

kde $\bar{\sigma}_{\theta\theta}(\theta)$ je střední hodnota tangenciálního napětí, d je rozměr oblasti integrace a $\sigma_{\theta\theta}(r, \theta)$ je tangenciální napětí v okolí vrcholu koncentrátoru napětí.

V tomto kritériu předpokládáme, že kritická hodnota tangenciálního napětí bude stejná v případě iniciace trhliny ze zářezu stejně jako i v případě šíření trhliny samotné. V případě homogenního materiálu s trhlinou je průběh napětí v blízkosti vrcholu trhliny znám a má tvar pro tahový mód I (7) [2]:

$$\sigma_{\theta\theta}(r, \theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (7)$$

kde K_I je součinitel intenzity napětí.

Jedinou proměnnou, která se ve vztahu (7) vyskytuje, je polární souřadnice r . Integrací vztahu (7) přes oblast d a dosazením za K_I jeho kritickou hodnotu $K_{I,c}$, známou též jako lomovou houževnatost, dostaneme kritickou hodnotu středního tangenciálního napětí $\bar{\sigma}_{\theta\theta,c}$ (8) [4], [5], [6], [7], [8]:

$$\bar{\sigma}_{\theta\theta,c} = \frac{2K_{I,c}}{\sqrt{2\pi d}} \quad (8)$$

Samotné kritérium stability poté nabývá tvaru (9). Trhlinka se nebude šířit z vrcholu obecného koncentrátoru napětí (koncentrátor napětí je stabilní), pokud hodnota středního tangenciálního napětí je menší než jeho kritická velikost.

$$\bar{\sigma}_{\theta\theta} < \bar{\sigma}_{\theta\theta,c} \quad (9)$$

3 NUMERICKÝ MODEL

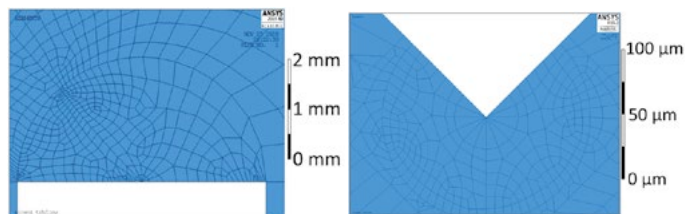
Pro zjištění vlivu výrobních tolerancí, konkrétně vlivu tloušťky zářezu, polohy dutiny h_{dutiny} , polohy zářezu h_{zarez} a jejich vzájemné polohy, na hodnotu iniciační síly F_{ini} byl s výhodou použit již vytvořený 2D model [10], [11], který ovšem bylo potřeba upravit. Konečnoprvková síť numerického modelu byla tvořena osmiuzlovými prvky PLANE 183 s nastavením K3 na rovinnou deformaci. Podmínka rovinné deformace byla zvolena vzhledem k tloušťce vzorku, která se jeví jako dostatečná.

Materiály byly modelovány jako lineárně elastické, izotropní, které jsou charakterizovány Youngovým modulem pružnosti E a Poissonovým poměrem ν . Vzhledem k použití kritéria střední hodnoty tangenciálního napětí byl pro vyhodnocení $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ použit, mimo výše uvedené parametry, další materiálový parametr – lomová houževnatost $K_{I,c}$. Přehled použitých materiálových parametrů nalezne čtenář v Tab. 1 [10], [11].

Tab. 1 Přehled materiálových parametrů použitých v MKP modelu.

Materiál	E [GPa]	ν [-]	$K_{I,c}$ [MPa·m ^{1/2}]
Jemnozrnný cementový kompozit	44,04	0,20	0,50
Ocelové příložky	210	0,30	–

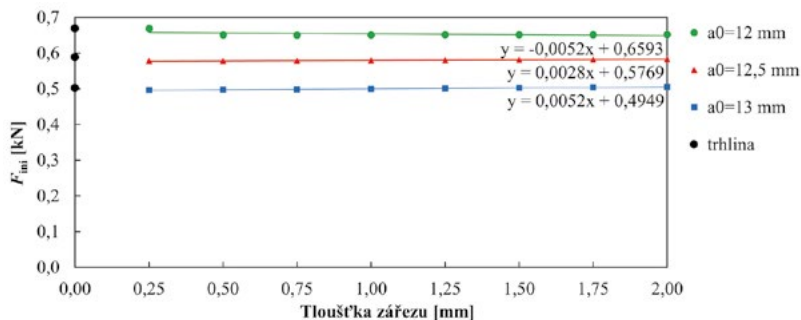
Z důvodu vysokých gradientů napětí okolo vrcholu dutiny a v oblasti zářezu byla velká pozornost věnována kvalitní a jemné síti v těchto místech, viz Obr. 2. Integrační délka d byla zvolena jako vzdálenost mezi zářezem a spodní hranou dutiny, jakožto dvěma koncentrátory napětí. Podle teorií lomové mechaniky, viz [12], [13], [14], předpokládáme, že oblast vymezená vzdáleností d odpovídá aktuálnímu přírůstku trhliny v konečné délce. V tomto případě byla oblast d rovna vzdálenosti mezi zářezem a dutinou, jelikož se jedná o potenciální koncentrátory napětí.



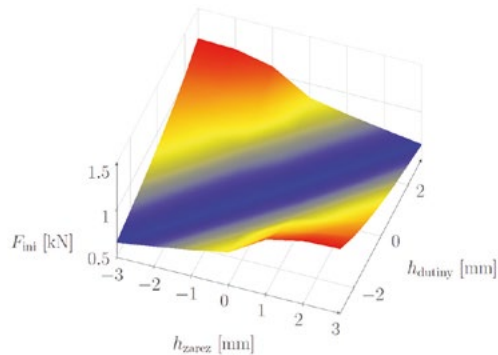
Obr. 2 (a) Radiální síť okolo zářezu; (b) radiální síť okolo vrcholu dutiny.

4 VÝSLEDKY

Na Obr. 3 je vidět grafické znázornění průběhu F_{ini} v závislosti na tloušťce zářezu pro jednotlivé délky zářezu a_0 . Graf odpovídá "ideální" poloze zářezu a dutiny, tzn. je platný pro hodnoty $h_{dutiny}=0$ a $h_{zarezu}=0$. Z průběhu závislosti F_{ini} na tloušťce zářezu je zřejmé, že pro zvolené rozmezí tlouštěk, je hodnota iniciační síly F_{ini} víceméně konstantní. Podobné závislosti bylo dosaženo pro všechny studované polohy dutiny a zářezu.

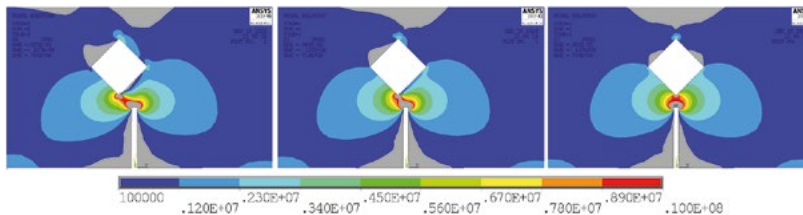
Obr. 3 Graf iniciační síly F_{ini} v závislosti na tloušťce zářezu.

Na Obr. 4 je znázorněn 3D graf závislosti iniciační síly F_{ini} na poloze zářezu h_{zarezu} a dutiny h_{dutiny} . Tento graf odpovídá tloušťce zářezu 1 mm a délce zářezu $a_0=12$ mm. U ostatních délek zářezu dochází pouze k vertikálnímu posunu grafu, nicméně samotný tvar grafu zůstává neměnný. Z 3D grafu je zřejmé, že se zmenšující se vzájemnou vzdáleností mezi dutinou a zářezem se zmenšují i hodnoty iniciační síly F_{ini} , které korespondují se silou nutnou k porušení tělesa, přičemž minimálních hodnot F_{ini} je dosaženo tehdy, nachází-li se dutina přímo nad zářezem. Rovněž s větší vzdáleností dutiny od tělesa (cca 4–6 mm v závislosti na délce trhliny) dochází ke změně šíření trhliny, která již není přitahována dutinou.



Obr. 4 Graf závislosti iniciační síly F_{ini} na poloze zářezu h_{zarez} a dutiny h_{dutiny} .

Izoplochy 1. hlavního napětí pro jednotlivé polohy zářezu h_{zarez} a dutiny h_{dutiny} jsou znázorněny na Obr. 5. Z těchto obrázků je zřejmé, že v oblasti zářezu a vrcholu dutiny vznikají vysoké gradienty napětí.



Obr. 5 Izoplochy 1. hlavního napětí pro $h_{zarez} = 0$ a pro (a) $h_{dutiny} = -3$ mm; (b) $h_{dutiny} = -1,5$ mm; (c) $h_{dutiny} = 0$ mm.

5 DISKUZE

Z prezentovaných výsledků (Obr. 5) je jasné, že dutina funguje jako další koncentrátor napětí, který určuje směr šíření trhliny. Z tohoto důvodu je důležité vzít ji do úvahy při stanovení délky integrační oblasti d , viz předchozí příspěvky autorů [10], [11]. Výsledky zobrazené v Obr. 4 poukazují na zřejmé, tj. nachází-li se dutina i zářez přímo nad sebou, je síla potřebná k iniciaci porušení minimální ve srovnání s ostatními polohami. Je evidentní, že čím menší plocha bude vzdorovat šíření trhliny, tím menší bude i síla nutná k jejímu porušení. S rostoucí vzdáleností mezi dutinou a zářezem (cca 4–6 mm v závislosti na délce zářezu) dochází ke změně šíření trhliny, která již není přitahována dutinou. Tyto výsledky jsou v dobré korelaci se zjištěními publikovanými v [15], kde autoři ovlivňují směr šíření trhliny za pomoci kruhového otvoru, konkrétně jeho průměrem a vzdáleností od čela trhliny v hliníkové slitině.

Hodnota iniciační síly vykazuje v tomto příspěvku nezávislost na tloušťce zářezu, což je v rozporu s publikovanými výsledky [16], [17]. U všech těchto publikací se s rostoucí tloušťkou zářezu zvyšuje (byť ne razantně) i hodnota maximální síly. Důvodem tohoto nesouladu je pravděpodobně iniciace šíření trhliny v numerickém modelu ze středu zářezu, zatímco ve skutečnosti by se trhlina šířila z vrubů, kde je vyšší koncentrace napětí i menší vzdálenost k vrcholu dutiny.

6 ZÁVĚR

Z podrobné numerické analýzy dospěli autoři k závěru, že výrobní tolerance výrazně ovlivňují lomové chování tělesa s dutinou, resp. hodnotu iniciační síly, při které se trhlina začne materiálem šířit. Největší vliv na změnu hodnoty iniciační síly má poloha dutiny a zářezu, včetně jejich vzájemné polohy, což je v souladu s již publikovanými výsledky. Minimální hodnoty dosahuje iniciační síla v případě, kdy se zářez a dutina nachází přímo nad sebou, což je způsobeno menší plochou, která vzdoruje šíření trhliny. Rovněž bylo zjištěno, že s rostoucí vzájemnou vzdáleností mezi dutinou a zářezem dochází ke změně šíření trhliny, která již není přitahována dutinou. V případě vlivu tloušťky zářezu na hodnotu iniciační síly se numerický model odchyluje od již publikovaných výsledků a bude jej tedy třeba upravit, případně rozšířit o další tvary čela trhliny (šípový, půlkruhový apod.).

Poděkování

Projekt byl realizován za finanční podpory Vysokého učení technického v Brně, konkrétně projekt juniorského specifického vysokoškolského výzkumu FAST-J-20-6532.

Použité zdroje

- [1] VYHLÍDAL, M., I. ROZSYPALOVÁ, T. MAJDA, P. DANĚK, H. ŠIMONOVÁ, B. KUCHARCZYKOVÁ a Z. KERŠNER. Fracture Response of Fine-Grained Cement-Based Composite Specimens with Special Inclusions. *Solid State Phenomena*. 2019, 292, 63-68. ISSN 1662-9779. DOI:10.4028/www.scientific.net/SSP.292.63
- [2] ANDERSON, T. L. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005. ISBN 08-493-1656-1.
- [3] WILLIAMS, M. L. On the stress distribution at the base of a stationary crack. *Journal of Applied Mechanics*. 1956, 24(1), 109-114. ISSN 0021-8936.
- [4] KNĚSL, Z., J. KLUSÁK a L. NÁHLÍK. Crack initiation criteria for singular stress concentrations: Part I: A universal assessment of singular stress concentrations. *Engineering mechanics*. 2007, 14(6), 399-408. ISSN 1802-1484.
- [5] KLUSÁK, J., Z. KNĚSL a L. NÁHLÍK. Crack initiation criteria for singular stress concentrations: Part II: Stability of sharp and bi-material notches. *Engineering mechanics*. 2007, 14(6), 409-422. ISSN 1802-1484.
- [6] NÁHLÍK, L., Z. KNĚSL a J. KLUSÁK. Crack initiation criteria for singular stress concentrations: Part III: An Application to a Crack Touching a Bimaterial Interface. *Engineering mechanics*. 2008, 15(2), 99-114. ISSN 1802-1484.
- [7] KLUSÁK, J., O. KREPL a T. PROFANT. Behaviour of a crack in a corner or at a tip of a polygon-like particle. *Procedia Structural Integrity*. 2016, 2, 1912-1919. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.240. ISSN 24523216. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452321616302517>
- [8] KLUSÁK J., O. KREPL, T. PROFANT: An easy and engineering stability criterion of general singular stress concentrators. *Theor. Appl. Fract. Mech.* 104 (2019) 102341.
- [9] DICKÝ, J., Z. MISTRÍKOVÁ a J. SUMEC. *Pružnost' a plasticita v stavebnictve 2*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2006. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 80-227-2515-3.
- [10] VYHLÍDAL, M.; KLUSÁK, J. Vliv parametrů GMTS kritéria na odhad lomového chování cementového kompozitu. In *Sborník příspěvků Juniorstav 2020*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2020. s. 462-467. ISBN: 978-80-86433-73-8.
- [11] VYHLÍDAL, M.; KLUSÁK, J. The influence of polygonal cavity on fracture behaviour of concrete. In *Procedia Structural Integrity*. *Procedia Structural Integrity*. Online: Elsevier, 2019. s. 690-697. ISSN: 2452-3216.
- [12] TAYLOR, D., P. CORNETTI a N. PUGNO. The fracture mechanics of finite crack extension. *Engineering Fracture Mechanics*. 2005, 72(7), 1021-1038. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2004.07.001. ISSN 00137944.
- [13] TAYLOR, D. The Theory of Critical Distances: A link to micromechanisms. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2017, 90, 228-233. DOI: 10.1016/j.tafmec.2017.05.018. ISSN 01678442.
- [14] CORNETTI, P., N. PUGNO, A. CARPINTERI a D. TAYLOR. Finite fracture mechanics: A coupled stress and energy failure criterion. *Engineering Fracture Mechanics*. 2006, 73(14), 2021-2033. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2006.03.010. ISSN 00137944.
- [15] LIAO, Y., Y. LI, M. HUANG, B. WANG, Y. YANG a S. PEI. Effect of hole relative size and position on crack deflection angle of repaired structure. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2019, 101, 92-102. ISSN 01678442. Dostupné z: doi:10.1016/j.tafmec.2019.02.010
- [16] SEITL, S., L. ŘOUTIL, J. KLUSÁK a V. VESELÝ. The influence of the shape of a saw-cut notch in quasi-brittle 3PB specimens on the critical applied force. *Applied and Computational Mechanics*. 2008, 2(1), 123-132. ISSN 2336-1182.
- [17] ZHANG, S., L. WANG a M. GAO. Experimental and Numerical Study of the Influence of Prefabricated Crack Width on the Fracture Toughness of NSCB Specimens. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020, 53(11), 5133-5154. ISSN 0723-2632. Dostupné z: doi:10.1007/s00603-020-02211-2.

VLIV AGRESIVNÍHO PROSTŘENÍ NA LOMOVOU ODOLNOST V KOMBINOVANÉM MÓDU I/II NAMÁHÁNÍ

INFLUENCE OF THE AGGRESSIVE ENVIRONMENT ON THE FRACTURE RESISTANCE UNDER THE MIXED MODE I/II LOAD

Petr Miarka^{*1}, Stanislav Seitl¹

^{*}petr.miarka@vut.cz

¹Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno.

Abstrakt

Předkládaný příspěvek se zabývá vlivem agresivního prostředí na lomovou odolnost v kombinovaném módu I/II namáhání. Pro tyto účely bylo zvoleno těleso tvaru brazilského disku vyrobené z vysokohodnotného betonu. Tyto disky byly po dobu 28 dní uloženy v plně nasyceném solném roztoku. Lomová odolnost v I/II módu byla stanovena pomocí kritéria obecného maximálního tangenciálního napětí (GMTS) a hloubka penetrace chloridů do betonového tělesa byla stanovena pomocí kolorimetrické metody. Agresivita prostředí přímo ovlivňuje lomovou houževnatost, avšak na tahovou pevnost má téměř nulový vliv.

Klíčová slova

BDCN, kombinovaný mód I/II, HPC, chloridy, GMTS

Abstract

This contribution deals with the influence of the aggressive environment on the fracture resistance under the mixed mode I/II load. For this a Brazilian disc with central notch specimen was made of the high-performance concrete. These discs were stored for 28 days in a fully saturated chloride solution. The fracture resistance under the mixed mode I/II has been evaluated based on the generalized maximum tangential stress (GMTS) criterion and the chloride penetration depth was measured by the colorimetric method.

Key words

BDCN, mixed mode I/II, HPC, chloride, GMTS

1 INTRODUCTION

The most problematic concrete property, which attracts the most attention, is its response to the tensile load as the tensile strength is approximately ten times lower than the compressive strength. Thus, the mode I - tensile crack opening and propagation is mostly studied, whereas the mode II shear cracks are often omitted in the aim of a given research. For instance, even a simply supported beam with a distributed load exhibits a combination of tensile and shear loading modes (See Fig. 1(left)).

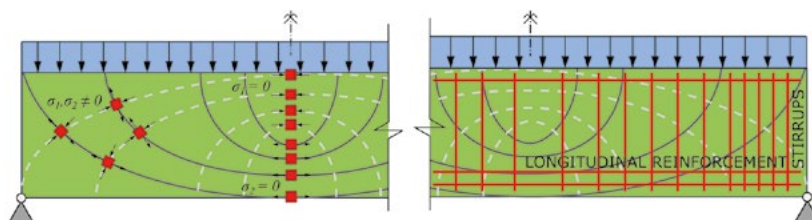


Fig. 1 Principal stress trajectories on the simply supported beam with a distributed load (left) and designed steel reinforcement (right).

If the beam’s response to this distributed load is plotted in principal stresses, one can find the location of the highest tensile stress (mid span) and the highest shear stress (above the support), which produce two main failure mechanisms of the concrete structure. However, there is a location with a combination of tensile and shear stress which cause the mixed mode I/II crack initiation due to transverse tension. These mixed mode I/II loading conditions and crack initiation are often neglected in the research studies. On the other hand, in practical design, this weakest material’s/structure’s point is being suppressed by using shear reinforcement – stirrups (See Fig. 1(right)).

In this study a Brazilian disc with central notch has been used in order to obtain the mixed-mode I/II fracture resistance under various environment aggressivity levels. The geometry and boundary conditions of BDCN are showed in Fig. 2.

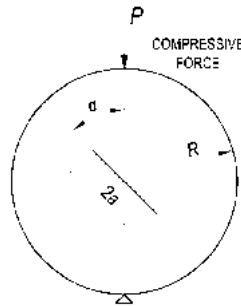


Fig. 2 Geometry and boundary condition of the BDCN specimen.

The aim of this pilot experimental study is to investigate the influence of the aggressive chloride environment on the fracture toughness K_{IC} and fracture resistance under the mixed mode I/II loading conditions of HPC mixture. For this, a series of experimental tests, including chloride-free and chloride-saturated specimens, was performed on the concrete Brazilian disc (BD) and on the concrete Brazilian disc with central notch (BDCN) samples.

2 THEORETICAL BACKGROUND

Usually, the mixed mode I/II fracture analysis is done by employing various fracture criteria. Traditional criteria are, for example, the maximum tangential stress (MTS) criterion [1] and the strain energy density (SED) criterion [2], or the recently postulated advanced fracture criteria, e.g. the generalized strain energy density (GSED) criterion [3], the averaged strain energy density (ASED) criterion [4], the extended maximum tangential strain (EMTSN) criterion [5], and the generalized maximum tangential stress (GMTS) criterion [6]. The traditional criteria for the mixed mode I/II fracture analysis are only using SIFs for mode I and mode II, while the advanced criteria use SIFs, T -stress (or more WE terms) and the critical distance r_c . In order to evaluate the fracture resistance under the mixed mode I/II, the GMTS criterion will be used.

The GMTS criterion was selected over the other criteria as the tangential stress $\sigma_{\theta\theta}$ steadily opens the crack in mode I (in tension) even when the pure mode II is present. Another reason is that the calculation and evaluation is relatively simple as the inputs are values of the SIFs, T -stress, material’s fracture toughness K_{IC} and critical distance r_c , which are determined from the analytical formulas. In addition to this, it provides reliable results on the concrete material, see [7].

$$[K_I \sin\theta_0 + K_{II}(3\cos\theta_0 - 1)] - \frac{16T}{3} \sqrt{2\pi r_c} \cos\theta_0 \sin\frac{\theta_0}{2} = 0 \tag{1}$$

3 EXPERIMENTAL DETAILS

In this experimental study, a HPC was designed in close cooperation with a concrete precast plant, in order to improve mechanical performance of C 50/60 [7], and to reduce the production costs. For this, a binder, Portland

cement CEM I 42.5 R, was used together with one mineral admixture. Moreover, the binder consisted of 88 % of CEM I 42.5 R and 12 % of metakaolin Metaver. The water/binder ratio was 0.25. The aggregates were composed of natural 0/4 mm sand and crushed high-quality granite with a size of 4/8 mm and 8/16 mm (minimum/maximum aggregate size of used sieve). A polycarboxylate-based superplasticizer was selected based on its compatibility with cement, and due to good workability of the mixture. The concrete was mixed in a 1 m³ volume, and poured immediately into moulds. The material composition per m³ is showed in Tab. 1.

Tab. 1 Material composition of studied High-performance concrete per m³.

CEM I 42.5R	Metakaolin Metaver	Superplasticizer	Water	Sand 0/4	Crushed aggregate 4/8	Crushed aggregate 4/8
575	80	20	165	680	200	810

The measured mechanical properties according to European standards are presented in Tab. 2

Tab. 2 Mechanical properties of studied HPC mixture.

Compressive strength at 1 day $f_{c,cube}$ [MPa]	30.2
Compressive strength at 28 days $f_{c,cube}$ [MPa]	102.0
Indirect tensile strength - cube f_{ct} [MPa]	5.8
Young's modulus - cube E_{cube} [GPa]	42.1
Young's modulus - cylinder E_{cyl} [GPa]	39.5

The prepared BDCN samples were stored in plastic containers filled to the maximum capacity and covered with plastic lids to eliminate excessive evaporation of water and the sodium chloride solution. These samples were stored with an adequate distance between each other, which allowed the solution (water and sodium chloride NaCl solution) to penetrate to the body equally over all the free surfaces. The samples were stored in such conditions for 30 days. The containers are shown in Fig. 3.



Fig. 1 Prepared BD and BDCN specimens stored in plastic containers filled with water and chloride solution in a laboratory room with a constant room temperature.

4 EXPERIMENTAL RESULTS

The specimens were not covered by epoxide layer on any of the outer surfaces, hence the chloride ions diffusion from every side was allowed. Therefore, 7 penetration depths in total were measured from the top and the bottom of the specimens' surfaces. Based on the results, one can notice that the specimens were affected by chloride ions approximately 4.73 mm from both the top and the bottom.

The measurement of the chloride penetration depth was conducted by the $AgNO_3$ colorimetric method as described in [7]. After the splitting tests, the chloride-contaminated specimens were sprayed with the $AgNO_3$ solution, then the depths were measured at intervals of approximately 10 mm to obtain seven values. To mitigate the 2D chloride ingress process near the edges, no measurement should be done in the zone within about 10 mm

from the edges of the sample. The measurement of chloride penetration depths is presented in Fig.4, where the unpenetrated ligament is highlighted with a green line, and the specimen is divided into regular sections.

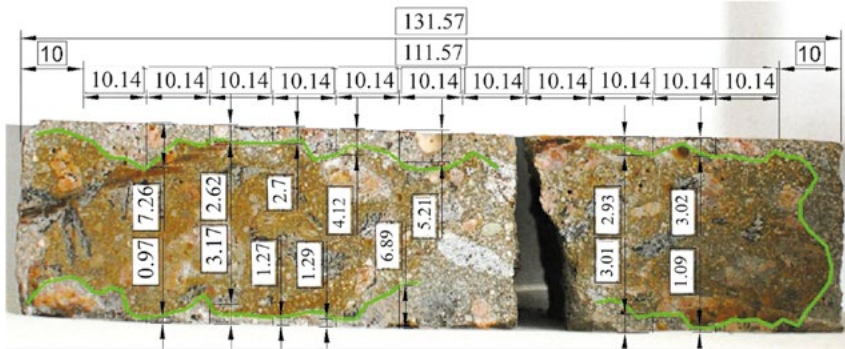


Fig. 2 Prepared BD and BDCN specimens stored in plastic containers filled with water and chloride solution in a laboratory room with a constant room temperature.

Using the calculated critical distances r_c , one can derive the fracture resistance curves for the mixed mode I/II loading conditions. Please note that if the critical distance r_c is equal to 0, the Eq. (1) simplifies itself to the traditional MTS criterion. The evaluated fracture resistance curves of the BDCN geometry for both studied cases of various environment aggressivity levels are showed in Fig. 5.

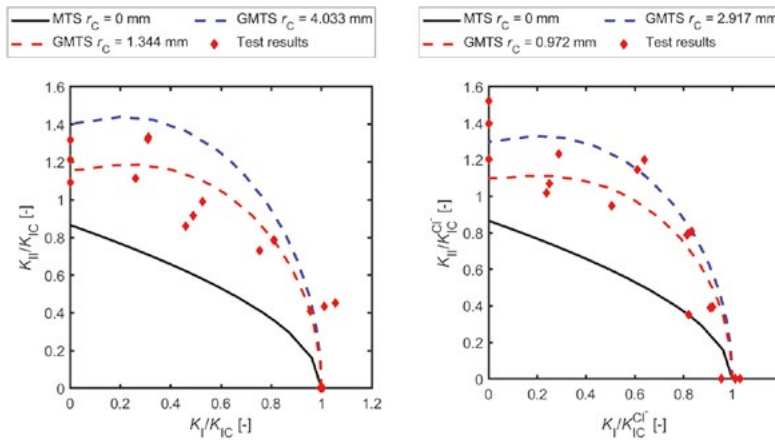


Fig. 3 Comparison of evaluated fracture resistance curve under the mixed mode I/II loading conditions – (left) chloride Cl⁻ free samples and (right) chloride Cl⁻ saturated samples.

From the fracture resistance curves presented in Fig. 5, the chloride free BDCN specimens show a better fracture resistance to the mixed mode I/II conditions. The GMTS fracture criterion predicts the fracture resistance with a relatively good agreement for both cases of the Cl⁻ environment. However, for the cases of pure mode II, the fracture resistance shows a relatively high dispersion for the cases of Cl⁻ saturated BDCN specimens. A visible discrepancy between the experimental results and the prediction of fracture criteria (MTS and GMTS) can be seen.

5 CONCLUSION

This experimental study showed a conjunction of the fracture mechanics with the ability of high-performance concrete (HPC) to resist an aggressive chloride environment. Moreover, the influence of a chloride-contaminated environment on the fracture toughness and fracture resistance under mixed mode I/II was presented. The experimental study was performed considering different aggressivity levels of the environment, water, and a fully

saturated sodium chloride solution. The experimental tests were performed on a Brazilian disc with central notch to evaluate the fracture toughness K_{IC} and the fracture resistance under mixed mode I/II. Mixed mode I/II fracture resistance was evaluated by the generalised maximum tangential stress (GMTS) criterion. The level of chloride contamination present and its boundary in the concrete was estimated by the colorimetric method using silver nitrate.

A clear influence of the chloride environment on the fracture toughness and fracture resistance to the mixed mode I/II load was observed. The chloride environment showed a 15% reduction of the experimentally measured fracture toughness K_{IC} . This led to the equivalent reduction of the fracture resistance under mixed mode I/II as showed in the relative and absolute coordinates. The chloride aggressivity has an influence on the fracture resistance under mixed mode I/II estimated by the GMTS criterion, as well as on the critical distance r_C . This reduction of critical distance r_C is associated with Friedel's salt as a product of the chloride reaction with metakaolin, which is present in the used Portland cement blend.

This influence of the chloride ingress on the concrete body and its degradation should not be omitted, as the crack can easily initiate and propagate, which can lead to damage, or worse, to the structure's premature failure.

Acknowledgement

The financial support of grant FAST-J-20-6341 is gratefully acknowledged.

References

- [1] F. Erdogan, G.C. Sih, On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear, *Journal of Basic Engineering*, 85 (1963) 519-525.
- [2] G.C. Sih, Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems, *International Journal of Fracture*, 10 (1974) 305-321.
- [3] M.R. Ayatollahi, M. Rashidi Moghaddam, F. Berto, A generalized strain energy density criterion for mixed mode fracture analysis in brittle and quasi-brittle materials, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 79 (2015) 70-76.
- [4] M.R.M. Aliha, F. Berto, A. Mousavi, S.M.J. Razavi, On the applicability of ASED criterion for predicting mixed mode I+II fracture toughness results of a rock material, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*,
- [5] M.M. Mirsayar, Mixed mode fracture analysis using extended maximum tangential strain criterion, *Materials & Design*, 86 (2015) 941-947.
- [6] D.J. Smith, M.R. Ayatollahi, M.J. Pavier, The role of T-stress in brittle fracture for linear elastic materials under mixed-mode loading, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 24 (2001) 137-150.
- [7] S. Seitl, P. Miarka, V. Bilek, The mixed-mode fracture resistance of C 50/60 and its suitability for use in precast elements as determined by the Brazilian disc test and three-point bending specimens, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 97 (2018) 108-11
- [8] NT BUILD 492 Concrete, mortar and cement-based repair materials:, in: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, NORDTEST, Espoo, Finland, 1999

5.

Vodní hospodářství a vodní stavby

Water Management and Water Structures

POUŽITIE REGIONÁLNEHO KLIMATICKÉHO SCENÁRA CLM PRI ANALÝZE SEZÓNNOСТИ KRÁTKODOBÝCH ZRÁŽOK

ANALYSIS OF THE SHORT-TERM RAINFALL SEASONALITY USING THE CLM REGIONAL CLIMATE SCENARIO DATA

Gabriel Foldes^{*1}, Silvia Kohnová¹

^{*}gabriel.foldes@stuba.sk

¹Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Abstrakt

Práca sa zameriava na analýzu sezónnosti krátkodobých intenzít zrážok pomocou metodiky Burnovho vektora. Údaje použité v analýze boli modelované regionálnym klimatickým modelom CLM pre vybrané klimatologické stanice na Slovensku. Analyzovali sme zmeny sezónnosti maximálnych zrážkových udalostí pre blízku budúcnosť (2031–2060) a ďalekú budúcnosť (2061–2100) pre vybrané trvania dažďov počas teplého polroka. Porovnanie výsledkov analýzy budúcich období bolo uskutočnené pomocou dát historického obdobia (1961–2020) modelovaných klimatickým modelom.

Klíčovú slova

Sezónnosť, krátkodobé dažde, CLM, klimatický scenár

Abstract

The study focuses on the seasonality analysis of short-term rainfall intensities using Burn's vector methodology. The data used in the analysis were modeled by regional climate model at selected climatological station in Slovakia. We analyzed changes of the seasonality of maximal rainfall events for the near future (2031–2060) and far future (2061–2100) for selected rainfall durations during the warm period. The comparison of the result of the analysis of future periods were made on the data from historical period (1961–2020) modeled by climate model.

Key words

Seasonality, short-term rainfall, CLM, climate scenario

1 ÚVOD

Celosvetovo sa zmenám klímy a ich dopadmi na zmeny charakteristík krátkodobých úhrnov dažďov venuje čoraz väčšia pozornosť. Pomocou informácií o sezónnosti výskytu extrémnych úhrnov dažďov je možné zistiť a s určitou pravdepodobnosťou predpovedať, v ktorých mesiacoch sa môžu vyskytnúť extrémne úhrny zrážok a s nimi spojené privalové povodne a následne sa na ne pripraviť [1]. Ako uvádza medzivládny panel pre zmenu klímy [2], klíma bude pravdepodobne premenlivejšia alebo extrémnejšia s veľmi pravdepodobným zvýšením frekvencie intenzívnych zrážok. Komplexné pochopenie sezónnosti extrémnych dažďov je nevyhnutné k štúdiám zaoberajúcim sa klímou, predpovediam povodní, rôznym hydrologickým aplikáciám ale aj k manažmentu povodňových rizík a mnohým ďalším odvetviam v hydrologickej praxi [3]. Laz a kol. [4] vysvetľujú, že sa v budúcnosti očakáva zmena intenzity a frekvencie extrémnych zrážok v dôsledku antropogénnej zmeny klímy, a že táto zmena nemusí, byť jednotná v priestorovom a časovom meradle.

Na analýzy intenzít zrážok sa často využívajú výstupy z klimatických scenárov/modelov, v tejto práci sú použité výstupy z regionálneho klimatického modelu CLM (Community Land Model), je to model, ktorý vznikol ako spolupráca vedcov z rôznych inštitúcií zaoberajúcich sa pozemnými, klimatickými a atmosférickými vedami v USA [5]. Model využíva koncepciu ekologickej klimatológie, ktorá je využívaná ako interdisciplinárny rámec na pochopenie prirodzených ale aj ľudských zmien vo vegetácii a ich vplyv na klímu. CLM sa zaoberá aspektmi, ktoré umožňujú štúdium obojsmerných interakcií medzi ľudskými činnosťami v krajine a podnebí vrátane zmien zemského pokryvu/zmien využívania pôdy, poľnohospodárskych postupov a urbanizácie [6].

Cieľom práce je analýza sezónnosti krátkodobých dažďov a to pomocou výstupov regionálneho klimatického scenára CLM. Analýza bola vykonaná pre obdobia blízkej (2031–2060) a ďalej (2061–2100) budúcnosti pre trvania dažďov od 60 minút do 1440 minút pre vybrané klimatické stanice na Slovensku: Dudince, Papín a Sliač. Výsledky analýzy pre budúce obdobia boli porovnávané zo scenárovou minulosťou (1961–2020).

2 METODIKA

Práca je venovaná analýze sezónnosti krátkodobých dažďov, na analýzu sa využila metóda Burnovho vektora. Táto metóda je často využívanou metódou pre odhad sezónnosti výskytu extrémnych úhrnov dažďov. Metóda opisuje variabilitu dátumu, pri ktorom sa maximálny úhrn zrážok vyskytuje. Smer vektora zodpovedá dňom výskytu v priebehu roka, zatiaľ čo jeho dĺžka opisuje variabilitu okolo dátumu výskytu. Burnov vektor [7] je vyjadrený po prvé určením orientácie (smeru) vektora pre dátum kedy nastala maximálna hodnota úhrnu v každom roku vzťahom:

$$\theta_i = D_i \frac{2\pi}{365} \quad (1)$$

Kde θ_i je orientácia dátumu výskytu maximálneho úhrnu v roku, i predstavuje celkový počet rokov v časovom rade, D_i je poradové číslo dátumu v roku i v ktorom sa maximálny úhrn vyskytol (1–365). Pričom ak $D = 1$ je zvolené pre 1 januára a $D = 365$ je 31 december. Smer priemerného vektora θ od počiatku predstavuje stredný dátum výskytu maximálnych javov v priebehu roka. Súradnice x a y sú dané vzťahmi:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(\theta_i), \quad (2)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin(\theta_i), \quad (3)$$

$$\bar{\theta} = \tan^{-1}(\bar{y}/\bar{x}). \quad (4)$$

Variabilitu dátumu výskytu okolo stredného dátumu je charakterizovaný pomocou dĺžkového parametra r :

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} / n \quad 0 \leq r \leq 1 \quad (5)$$

Rozmedzie parametra r sa pohybuje od 0 po 1, pričom 0 znamená, že extrémne javy sú rovnomerne rozdelené počas roka, $r = 1$ znamená, že extrémne javy v danej stanici nastávajú v daný deň v roku.

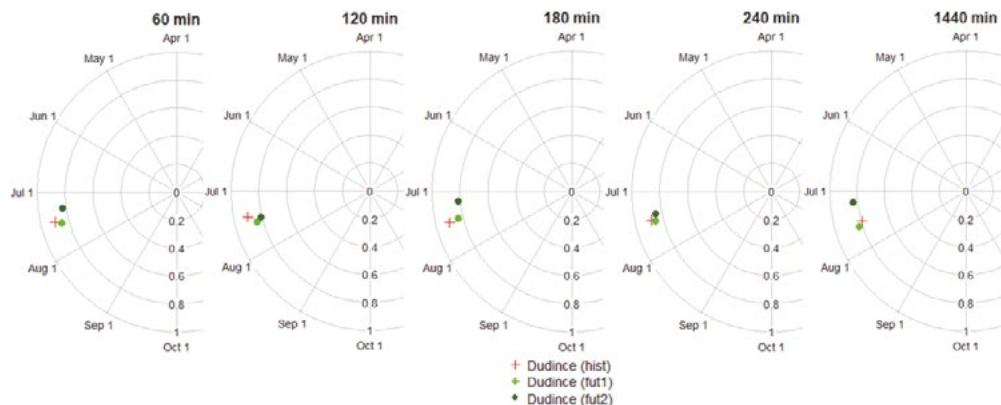
3 VSTUPNÉ ÚDAJE

Vstupné údaje tvorili súbory dát z CLM modelu pre vybrané klimatologické stanice. Hodnotené obdobia boli zvolené historické (1961–2020), blízka budúcnosť (2031–2060), ďaleká budúcnosť (2061–2100). Analýza bola vykonávaná pre zvolené trvania dažďov a to 60, 120, 180, 240 a 1440 minút. Údaje boli poskytnuté doc. RNDr. Martinom Gerom, PhD. z Univerzity Komenského v Bratislave [8].

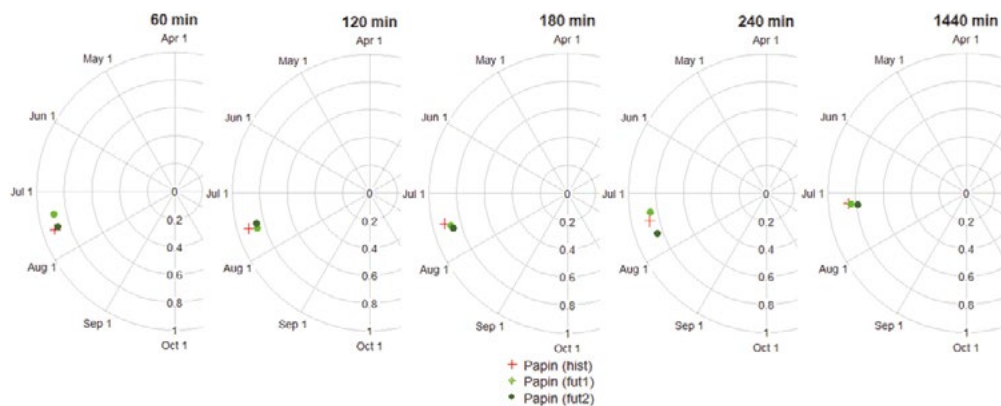
4 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Výsledky analýzy podľa metodiky Burnovho vektora sú prezentované na jednotkových kružniciach a to pre všetky klimatologické stanice a jednotlivé trvania dažďov (Obr. 1–3). V klimatologickej stanici Dudince sa výskyt maximálnych dažďových úhrnov objavili v mesiaci júl a to prevažne v prvej polovici mesiaca. Najväčšie odchýlky medzi scenárovou minulosťou a budúcnosťou boli v trvaniach 60, 180 a 1440 minút a to 5–10 dní (Obr. 1). Pri klimatologickej stanici Papín (Obr. 2) boli detegované najmenšie rozdiely medzi scenárovou minulosťou a budúcnosťou a to v rozmedzí od 2–5 dní. Najväčšie rozdiely boli v trvaniach 60 a 240 minút. V klimatologickej stanici Sliač sa výskyt maximálnych dažďových úhrnov pohyboval v mesiaci júl a to vo väčšine zvolených trvaní v strede mesiaca. Najväčšie odchýlky od scenárovej minulosti a budúcnosti boli v trvaniach 240 a 1440 minút a to

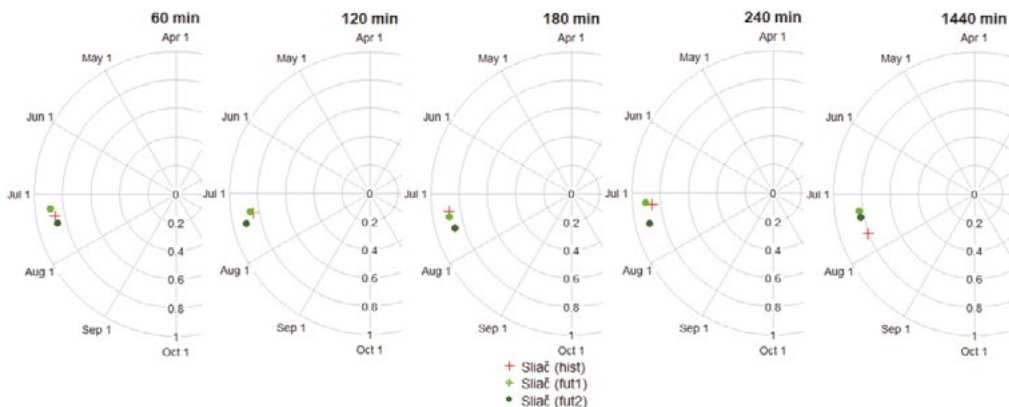
od 7–12 dní. V prípade 1440 minút je trend sezónnych výskytov opačný ako v kratších trvaniach a to výskyt v skoršom období ako v scenárovej minulosti. Výsledky sú uvedené na Obr. 3.



Obr. 1 Výskyt maximálnych úhrnov dažďov v klimatologickej stanici Dudince.



Obr. 2 Výskyt maximálnych úhrnov dažďov v klimatologickej stanici Papin.



Obr. 3 Výskyt maximálnych úhrnov dažďov v klimatologickej stanici Sliac.

5 ZÁVER

Použitím výstupov regionálneho klimatického scenára CLM bola vykonaná analýza sezónnosti krátkodobých dažďov. Analýza bola realizovaná na troch klimatologických staniách v rámci Slovenska menovite: Dudince, Papín a Sliač. Porovnávané boli tri časové obdobia a to scenárová minulosť (1961–2020), blízka budúcnosť (2031–2060) a ďaleká budúcnosť (2061–2100) a pre trvania dažďov 60, 120, 180, 240 a 1440 minút. Výsledky poskytli informácie o výskytoch maximálnych dažďových javov pričom pre analyzované klimatologické stanice to bolo v mesiaci júl. Najmenšie rozdiely medzi scenárovou minulosťou a budúcnosťou boli v klimatologickej stanici Dudince. Najväčší rozdiel medzi scenárovou minulosťou a budúcnosťou bol detegovaný v klimatologickej stanici Sliač. Rozdiel medzi minulosťou a budúcnosťou vo výskyte maximálnych dažďových javov v klimatologických staniách sa pohybuje v rozmedzí od 5–10 dní. Výsledky poskytujú prehľad zmien maximálnych dažďových javov a ich sezónnosti v analyzovaných staniách do budúceho obdobia podľa regionálneho klimatického scenára CLM.

PodĎakovanie

Tento článok vznikol vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: „Údajová a vedomostná podpora pre systémy rozhodovania a strategického plánovania v oblasti adaptácie poľnohospodárskej krajiny na klimatické zmeny a minimalizáciu degradácie poľnohospodárskych pôd“ (kód ITMS2014+ 313011W580), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja a vďaka podpore Agentúry na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-19-0340 a projektu VEGA 1/0782/21. Autori ďakujú za podporu pri tvorbe tohto príspevku.

Použité zdroje

- [1] WILLEMS, P. Revision of urban drainage design rules after assessment of climate change impacts on precipitation extremes at Uccle, Belgium. *Journal of Hydrology*. 2013, roč. 496, s. 166–177. ISSN 00221694. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.05.037
- [2] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [online]. B.m.: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA ISBN 9781107661820. www.cambridge.org
- [3] ILIOPOULOU, T. – KOUTSOYIANNIS, D. – MONTANARI, A. Characterizing and Modeling Seasonality in Extreme Rainfall. *Water Resources Research* [online]. 2018, roč. 54, č. 9, s. 6242–6258. ISSN 00431397. doi:10.1029/2018WR023360
- [4] LAZ, O. U. – RAHMAN, A. – YILMAZ, A. – HADDAD, A. Trends in sub-hourly, sub-daily and daily extreme rainfall events in eastern Australia. *Journal of Water and Climate Change*. 2014, roč. 5, č. 4, s. 667–675. ISSN 24089354. doi:10.2166/wcc.2014.035
- [5] UCAR (University Corporation for Atmospheric Research) CLM Home. 2019. <http://www.cgd.ucar.edu/tss/clm/>
- [6] BÖHM, U. – KÜCKEN, M. – AHRENS, W. – BLOCK, A. – HAUFFE, D. – KEULER, K. ROCKEL, B. – WILL, A. CLM – the climate version of LM: brief description and long-term applications. *COSMO Newsl*. 2006. Vol. 6, p. 225–235.
- [7] BURN, D. H. Catchments similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *Journal of Hydrology*. 1997.
- [8] LAPIN, M. – BAŠTÁK-ĎURÁN, I. – GERA, M. – HRVOL, J. – KREMLER, M. – MELO, M. 2012. New climate change scenarios for Slovakia based on global and regional general circulation models. *Acta Met. Univ. Comen*. 2012, roč. 37, s. 25–74.

PROBLEMATIKA MODELOVANIA KVANTITATÍVNEJ VODOHOSPODÁRSKEJ BILANCIE POVRCHOVÝCH VÔD V MODELI WEAP

PROBLEMATICS OF MODELING OF QUANTITATIVE WATER MANAGEMENT BALANCE OF SURFACE WATER IN THE WEAP MODEL

Miroslav Kandra^{*,1}

* miroslav.kandra@stuba.sk

¹ Katedra vodneho hospodarstva krajiny, Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovensko,

Abstrakt

Príspevok sa zameriava na problematiku modelovania retrospektívnej kvantitatívnej vodohospodárskej bilancie povrchových vôd pomocou simulačného bilančného softvéru Water Evaluation and Planning (WEAP) s ohľadom na implementáciu súčasnej metodiky vodohospodárskych bilancií na Slovensku. Modelovanie povodia Hrona ukázalo, že vďaka možnosti vytvárať nové premenné v rámci dátovej štruktúry je možné dosiahnuť požadovanú kompatibilitu so stanovenou metodikou vodohospodárskych bilancií povrchových vôd. Vďaka tejto skutočnosti a vytvorenej metodike simulovania prietokov bolo možné v rámci modelovania odhaľovať nové súvislosti a problémy, ktoré vyžadujú riešenie a úpravu ako metodiky modelovania, tak aj samotnej metodiky kvantitatívnej vodohospodárskej bilancie povrchových vôd.

Kľúčové slová

WEAP, Hron, vodohospodárska bilancia

Abstract

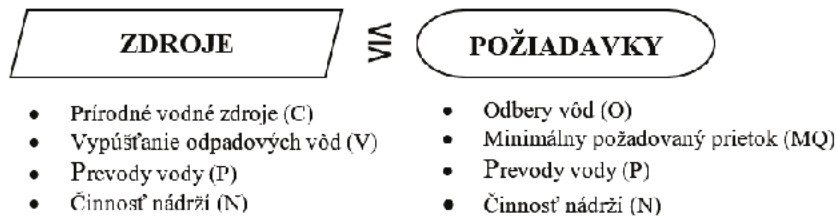
The paper focuses on the problematics of the modelling of a retrospective quantitative water management balance of surface waters using the simulation balance software WEAP with regard to the implementation of the current methodology of water management balance in Slovakia. Modelling of the Hron river basin has shown that thanks to the possibility to create new variables within the data structure, it is possible to achieve the required compatibility with the set methodology of water balances. Thanks to this fact and the created methodology of flow simulation, it was possible to reveal new contexts and problems within the modeling, which require solution and modification of both the modeling methodology and the methodology of quantitative water management of surface waters.

Key words

WEAP, Hron, water management balance

1 ÚVOD

Definíciou kvantitatívnej vodohospodárskej bilancie je porovnanie vodných zdrojov s požiadavkami na vodu v čase a v priestore. Jeho účelom je posúdiť interaktívne prvky vodohospodárskej bilancie a vyhodnotiť, či, kedy a kde nebudú splnené požiadavky na vodu. Tento primárny vzťah o nerovnosti je v tejto podobe zriedka použiteľný, pozri obr. 1 [1]. Na vyjadrenie skutočnej situácie je tiež potrebné vziať do úvahy premenlivosť všetkých prvkov tejto nerovnosti: prírodné zdroje vody, odbery vody, vypúšťanie odpadovej vody, vplyv nádrží, prevody vody a minimálny požadovaný prietok [2].



Obr. 1 Univerzálny vzťah nerovnosti vo vodnom hospodárstve na Slovensku.

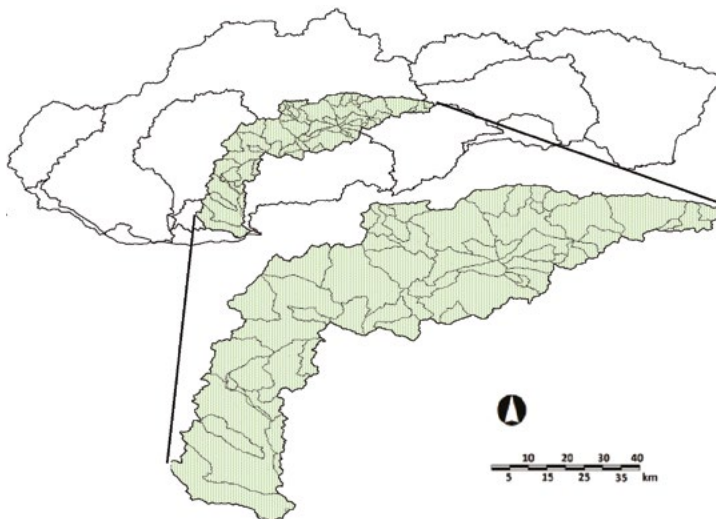
Každý z týchto prvkov prináša do hodnotenia vodohospodárskej bilancie povrchových vôd okrem svojho vplyvu taktiež určité neistoty. V prípade užívania vody správnosť nahlasovaných údajov, pri odberoch podzemnej vody určenie miesta ich vplyvu na povrchové vody, pri vypúšťaní odpadových vôd absencia vzťahu s odbermi vôd. Pri nádržiach ide zase o správnosť nahlasovanej manipulácie a vplyv menších nádrží, ktoré nie sú v rámci bilancie hodnotené a pri prevodoch vody ide o zložité prvky, ktoré sú avšak len stroho definované. V prípade minimálneho požadovaného prietoku je otázna jeho stanovená hodnota pre dané bilančné profily, v ktorých prebieha hodnotenie bilančného stavu.

Tieto faktory su impulzom pre aplikáciu simulačného softvéru vo vodnej bilancií Slovenska, ako možnym nástrojom na ich analýzu a riešenie. Celosvetovo sú simulačné softvéry pre vodohospodárske bilancie nástrojmi na modelovanie komplikovaných vodných prostredí, či už pri rozhodovaní o prerozdelení obmedzených vodných zdrojov alebo pri ich analýze a bilancií. Aj keď je základ týchto modelov rovnaký, ich vývoj vždy smeruje daný model k zameraniu na konkrétne úlohy.

Doteraz bolo vyvinuté veľké množstvo softvérov na riešenie problematiky v oblasti vodného hospodárstva a prerozdelenia vodných zdrojov. Možno spomenúť napr. RIBASIM, MIKE Basin a WEAP, ktoré prešli najvýznamnejším vývojom a v praxi sú na celom svete najčastejšie používané [3], [4], [5], [6], [7]. V prípade softvéru WEAP dátová štruktúra modelu poskytuje možnosť voľne vytvárať nové vlastnosti prvkov a definovať ich pomocou matematických, logických a modelovacích funkcií, čím poskytuje vhodný nástroj pri modelovaní vzhľadom na metodiku vodohospodárskej bilancie na Slovensku.

2 MODELOVANÉ POVODIE

V rámci monitorovania stavu povrchových vôd existuje na Slovensku pomerne hustá sieť vodomerných a meteorologických staníc. Pri modelovaní kvantitatívnej vodohospodárskej bilancie povrchových vôd na povodí rieky Hron v mesačnom časovom kroku bol použitý časový rad vstupných údajov od roku 2000 po 2019.



Obr. 2 Mapa polohy povodia Hrona a zobrazenie jednotlivých subpovodií.

V danom období bolo vybraných 53 aktívnych vodomerných staníc a 2 bilančné profily, pre ktoré bola samostatne kalkulovaná hydrologia povrchových vôd. Na povodí bolo aktívnych 123 odberov povrchových vôd, 773 odberov podzemných vôd, 321 vypúšťaní odpadových vôd, 4 nádrže a 2 prevody vody.

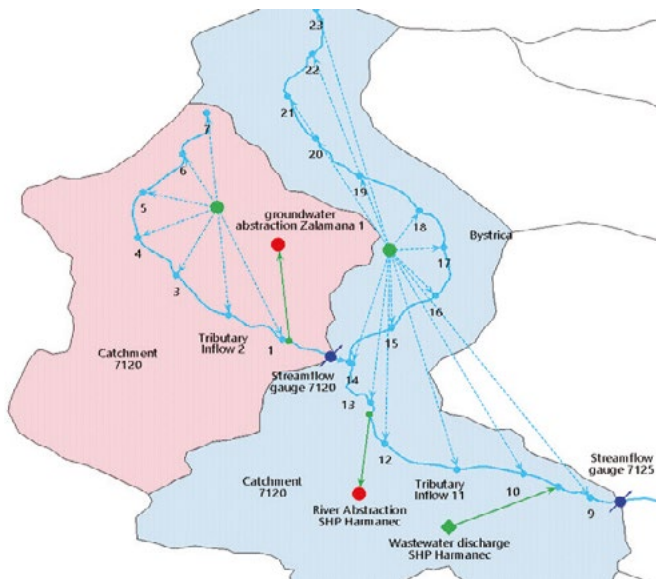
3 METODIKA MODELOVANIA

Grafické používateľské rozhranie programu WEAP obsahuje päť hlavných zobrazení: Schéma, Údaje, Výsledky, Prieskumník scenárov a Poznámky. Ručné vytvorenie schémy sa vykonáva v schematickej časti. V súčasnosti, so zameraním na maximálnu automatizáciu, sú len toky jedinými objektami, ktoré je potrebné vytvoriť ručne. Vytváranie tokov môže byť automatizované len čiastočne. V prvom kroku je potrebné ich v programe WEAP vytvoriť ručne, ale iba ich jednoduché geometrické znázornenie (je potrebné vytvoriť aspoň jednu čiaru). Po ich vytvorení sa vektorová vrstva reprezentujúca tieto toky uloží do priečinka daného modelu. V druhom kroku je možné ho upraviť pomocou GIS nahradením geometrie týchto objektov geometriou podkladovej vrstvy predstavujúcej tieto toky. V súčasnosti musia byť všetky vrstvy v referenčnom súradnicovom systéme WGS 84. Vytváranie bodových objektov je možné vykonať zostavením zoznamu skriptov v sekcii skriptov, ktorá je umiestnená na hornej lište (Advanced >> Scripting >> Edit script). Všetky objekty zdieľajú podobnú formu skriptu. Podrobný popis je v používateľskej príručke programu WEAP [8].

Povodie Hrona bolo pre potreby modelovania jednoduchej hydrologie rozdelené na subpovodia jednotlivých vybraných vodomerných staníc a vybraných bilančných profilov. Odtok z jednotlivých subpovodií bol definovaný prostredníctvom vypočítaného odtokového koeficientu pre jednotlivé subpovodia v danom časovom kroku na základe údajov o zrážkach a prietokoch, podľa vzťahu:

$$C = \frac{\Delta Q - X}{AP} \quad (1)$$

Kde je C – odtokový koeficient [-], ΔQ – rozdiel odtoku a prítoku do subpovodia podľa vodomerných staníc [m^3], X - vplyv užívateľov vody na tok [m^3], A – plocha subpovodia [m^2], P – zrážkový úhrn [m].



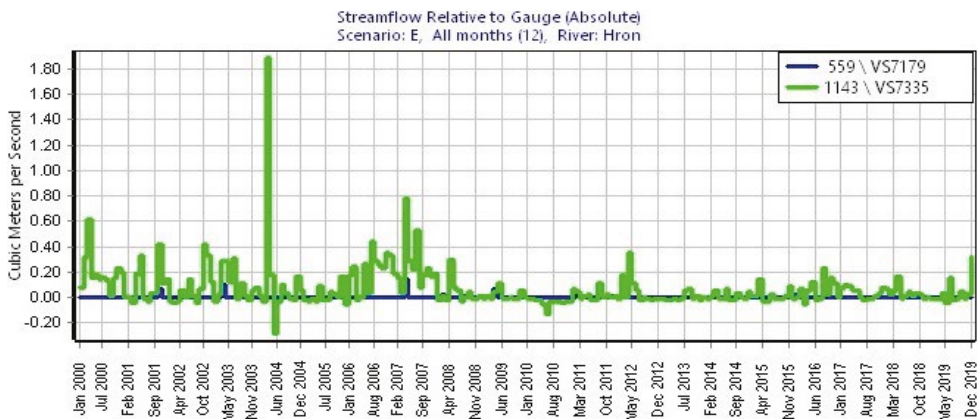
Obr. 3 Schematický pohľad na distribúciu prúdenia vody z odtokových oblastí do profilov vodomerných staníc; vodomerná stanica (modrý kruh), odberné miesta (červený kruh), uzol subpovodia (zelený kruh), vypúšťanie odpadových vôd (zelený obdĺžnik), odtokové body (bledomodrý kruh).

Tento vzťah je možné použiť pri dopočítaní prietoku v bilančných profiloch a taktiež vodomerných stanicách v časových úsekoch, kedy v daných vodomerných stanicách nie sú dostupné prietokové údaje. V takom prípade je potrebné určiť danému subpovodiu odtokový koeficient iného subpovodia s podobnými vlastnosťami, prípadne ho interpolovať.

Odtok zo subpovodia je vypočítaný vynásobením koeficientu odtoku so zrážkovým úhrnom a jeho distribúciou do odtokových uzlov vytvorených v danom intervale riečného kilometra (Obr. 3). Uzly zdieľajú percentuálny podiel odtoku na základe ich podielu na ploche odtokovej oblasti v mieste lokalizácie vodomernej stanice.

4 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Vzhľadom na metódu použitú pri výpočte prietoku by mal byť rozdiel medzi simulovaným a pozorovaným prietokom nulový. Verifikácia modelu bola realizovaná porovnaním nameraných a modelovaných prietokov v jednotlivých vodomerných staniách.

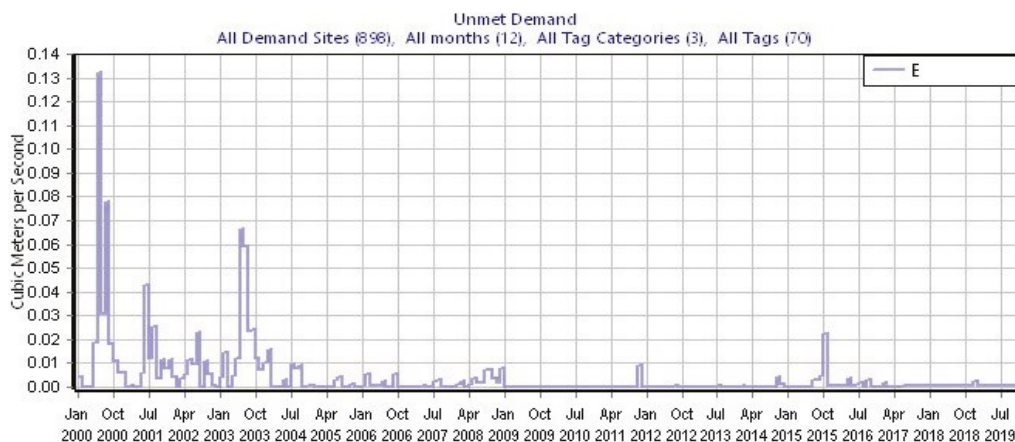


Obr. 4 Porovnanie simulovaného a pozorovaného prietoku na rieke Hron vo vodomerných staniách 7179 - Zvolen (rkm 157,7) a 7335 - Kamenín (rkm 10,9) v rokoch 2000 – 2019.

Po profil vodomernej stanice 7179 - Zvolen, nad prítokom rieky Slatina je namodelovaný prietok takmer vo všetkých časových krokoch rovný nameranému prietoku. Veľké rozdiely medzi namodelovaným a nameraným prietokom v profile vodomernej stanice 7335 - Kamenín, zobrazené na obr. 4 sú dôsledkom nezabezpečených odberov povrchových vôd a manipuláciou na vodných nádržiach zasahujúcou mimo objemy danej nádrži. Navýšením objemov danej nádrži a umiestnením odberných miest nezabezpečených odberov z prítokov na hlavný tok povodia (Hron) bolo možné značne znížiť rozdiel v týchto prietokoch (Obr. 5).

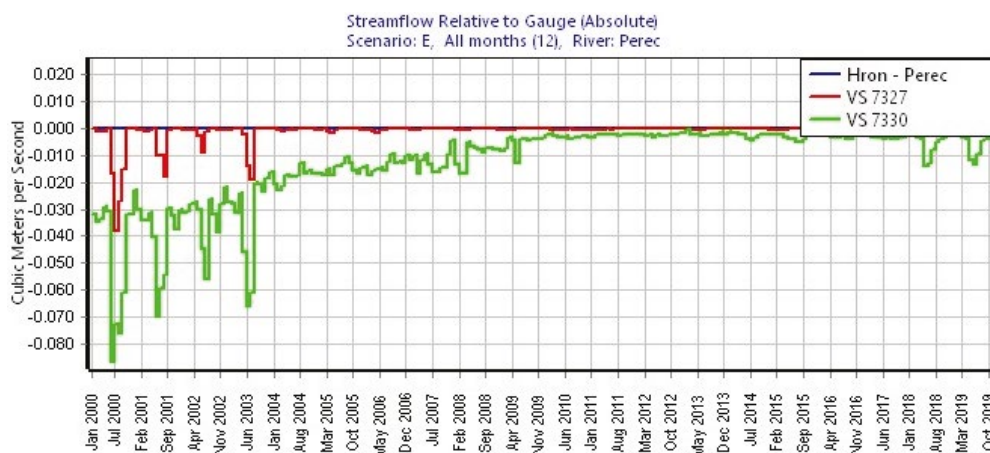


Obr. 5 Porovnanie simulovaného a pozorovaného prietoku na rieke Hron vo vodomerných staniách 7179 – Zvolen (rkm 157,7) a 7335 – Kamenín (rkm 10,9) pri úprave vlastností prvkov VHB.



Obr. 6 Nezabezpečené odbery podzemných vôd na celom povodí rieky Hron v rokoch 2000–2019.

Pretrvávajúce rozdiely sú dôsledkom nezabezpečených odberov podzemných vôd (obr. 6), vzhľadom na aplikovanú metodiku ich priradovania k tokom. V prípade vodomernej stanice 7335 - Kamenín sú rozdiely taktiež spôsobené komplikovaným zadefinovaním prevodu vody, kanálom Perc (obr. 7).



Obr. 7 Porovnanie simulovaného a pozorovaného prietoku na prevode Perc v vodomerných staniciach 7327 – Starý Tekov (rkm 50,2), 7330 – Zálaba (rkm 10,8) a v mieste prevodu vody z rieky Hron do kanálu Perc.

5 ZÁVER

Pre optimálny a úspešný vývoj, plánovanie a predpovede vo vodnom hospodárstve je potrebný podrobný obraz a vedomosti o potrebe vody v priestore a v čase. Vodohospodárske bilancie sú jednou z hlavných činností vodného hospodárstva pri zabezpečovaní nárokov na vodu. Na spracovanie retrospektívnej kvantitatívnej vodohospodárskej bilancie a na analýzu vplyvu jednotlivých prvkov ovplyvňujúcich povodie rieky Hron za obdobie rokov 2000 - 2019 bola použitá pomerne jednoduchá modelová štruktúra, ktorú softvér WEAP poskytuje, doplnená o potrebné vlastnosti a premenné.

Vplyv nezabezpečených odberov, nekompatibilita medzi nahlásenou manipuláciou a objemom nádrží a taktiež chybné priradenie jednotlivých užívateľov k subpovodiám má za následok rozdiely medzi namodelovaným a nameraným prietokom. Zatiaľ čo chybné priradenie užívateľov ku subpovodiám je možné detegovať a následne opraviť, v ostatných prípadoch ide o problémy vyplývajúce z nedostatočnej kompatibility medzi metodikou vodohospodárskej bilancie a metodikou modelovania.

V prípade nahlasovanej manipulácie na vodných nádržiah je potrebné overiť ich relevantnosť, pričom v rámci modelovania nádrží ma vzhľadom na metodiku VHB prednosť modelovanie nahlásenej manipulácie pred modelovaním skutočných objemov nádrže.

Pri odberoch povrchových vôd, ktoré nemajú zabezpečený odber je dôvodom absencia prameňov, ktoré nadlepšujú prietokové pomery v oblastiach prameňov jednotlivých tokov a jednotlivých nádrží, z ktorých priamo dane odbery povrchových vôd čerpajú.

V prípade odberov podzemných vôd pri modelovaní nie je bráný ohľad na rozdiel medzi odbermi z prameňov a odbermi zo studni, pričom obe kategórie spadajú pod odbery podzemných vôd. V prípade odberov z prameňov je potrebné namodelovať výdatnosť prameňa a odber z prameňa v rovnakom bode. Pre odbery zo studni, teda priamo z podzemných vôd je vplyv týchto odberov na povrchové vody možné simulovať pomocou implementácie modelu podzemných vôd do modelu povrchových vôd v programe WEAP pomocou prepojenia s programom MODFLOW [9].

Zatiaľ čo modelovanie celého povodia rieky Hron v 20 ročnom časovom úseku slúžilo ako úspešný test kompatibility vytvorenej metodiky modelovania a schopnosti programu WEAP, vytvorenie a implementácia riešení vzniknutých problémov v modelovaní vyžaduje podstatne menšie povodie, na ktorom bude možné operatívne rýchlo testovať rôzne spôsoby riešenia vzniknutých problémov.

Pod'akovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV- 19-0340.

Použité zdroje

- [1] J. Plainer, „Využívanie a ochrana vodných zdrojov“, MLVH Česko-Slovensko, Praha, 1983.
- [2] J. Poorová, „Metódy vodohospodárskej bilancie“, Dizertačná práca, STU Bratislava 2007.
- [3] M. M. Omar, „Evaluation of actions for better water supply and demand management in Fayoum, Egypt using RIBASIM,“ *Water Science*, 27(54), 78-90, 2013.
- [4] K. S. Meijer, W. N. M. Van der Krogt, E. van Beek, “A new approach to incorporating environmental flow requirements in water allocation modeling,“ *Water resources management*, 26(5), 1271-1286, 2012.
- [5] M. K. Jha, A. D. Gupta, “Application of Mike Basin for water management strategies in a watershed,“ *Water International*, 28(1), 27-35, 2003.
- [6] B.Höller mann, , S. Giertz, B. Diekkrüger, “Benin 2025—Balancing Future Water Availability and Demand Using the WEAP ‘Water Evaluation and Planning’ System,“ *Water Resour Manage* 24, 3591–3613, 2010.
- [7] X. Li, Y. Zhao, C. Shi, J. Sha, Z.L. Wang, Y. Wang, “Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal Binhai New Area, China. *Ocean & Coastal Management*, 106, 97-109, 2015.
- [8] J. Sieber, D. Purkey, “Water Evaluation And Planning (WEAP) System user guide,“ Stockholm Environment Institute, Somerville, MA, USA, 2015.
- [9] R. Hadded, I. Nouiri, O. Alshihabi, J. Maßmann, M. Huber, A. Laghouane, ... J. Tarhouni, “A decision support system to manage the groundwater of the zeuss koutine aquifer using the WEAP-MODFLOW framework,“ *Water resources management*, 27(7), 1981-2000, 2013.

AGROLESNICKÁ OPATŘENÍ V RÁMCI POZEMKOVÝCH ÚPRAV A JEJICH VLIV EROZNÍ A ODTOKOVÉ POMĚRY

AGRICULTURAL MEASURES IN THE FRAMEWORK OF LAND CONSOLIDATION AND THEIR INFLUENCE ON SOIL PROPERTIES

Kateřina Suchá^{*1}, Věra Horáková¹, Miroslav Dumbrovský²

*sucha.k@fce.vutbr.cz

¹Ústav vodního hospodářství obcí, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Žitkova 17, 602 00 Brno Abstrakt

Abstrakt

Cílem tohoto výzkumu je komplexní zhodnocení retenční schopnosti krajiny v závislosti na použití půdoochranné technologie ve vybrané lokalitě a porovnání vybraných hydropedologických charakteristik v kontextu hospodaření s půdou. Lokalita je modelově vyhodnocena z hlediska erozních a odtokových poměrů. V další etapě je v plánu vyhodnocení změn vybraných fyzikálních hydropedologických charakteristik v průběhu roku v podmínkách klimatické změny.

Klíčová slova

CN, eroze půdy, fyzikální, chemické a biologické vlastnosti půdy, USLE, zrnitost

Abstract

The aim of this research is a comprehensive evaluation of the retention capacity of the landscape depending on the use of soil protection technology in a selected locality and a comparison of selected hydropedological characteristics in the context of land management. The area is modeled in terms of erosion and runoff conditions. In the next stage, the plan is to evaluate the changes in selected physical hydropedological characteristics during the year in the conditions of climate change.

Key words

CN, soil erosion, physical, chemical and biological properties of soil, USLE, the particle size distribution

1 ÚVOD

V současné době se klade velký důraz na ochranu a kvalitu půdy, zadržení vody v krajině a celkově na změnu současného vzhledu a stavu krajiny. Půda patří k nejcennějším přírodním bohatstvím každého státu a je též přírodním zdrojem, který nelze obnovit, a proto je nutno ji chránit. Zaujímá významnou složku životního prostředí s širokým rozsahem funkcí a je základním výrobním prostředkem v zemědělství a lesnictví.

V podmínkách České republiky je půda ohrožena především vodní a větrnou erozí, dále pak utužením, acidifikací, sesuvy, znečištěním a úbytky organické hmoty. Nejčastější způsob degradace půdy je vodní eroze.

Vodní eroze má negativní účinky, a to zejména na odnos organických a minerálních částic půdy z erodovaných ploch a v jejich ukládání na jiných místech. Dalšími negativními vlivy jsou škody na obecním a soukromém majetku, zanášení vodních toků a vodních nádrží, pronikání zbytků agrochemikálií a rizikových látek do vodního prostředí.

Podle analýz Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy, je v současné době v České republice ohroženo více než 50 % zemědělské půdy vodní erozí a více než 10 % větrnou erozí. Zejména pak v posledních několika desetkách let se degradace půdy vlivem eroze velmi výrazně zrychlila. Na vině je především intenzifikace zemědělství a větší míra pěstování některých plodin [1].

V oblasti zemědělství stále ve větší míře převládá průmyslová agrotechnika s rozsáhlými monokulturními lány a nadměrným používáním hnojiv a pesticidů. Tento přístup má velice neblahý vliv na kvalitu půdy, podzemních vod i biodiverzitu.

Tato práce je zaměřena na prokázání pozitivního vlivu agrolesnických systémů (ALS) v rámci pozemkových úprav. Předmětem výzkumu je vedle hodnocení erozních a odtokových poměrů také hodnocení hydrofyzikálních vlastností půdy.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Vybraná zájmová lokalita se nachází v Jihomoravském kraji v okrese Hodonín v katastrálním území Šardice v oblasti intenzivně zemědělsky využívané, kde byly dokončeny komplexní pozemkové úpravy. Toto katastrální území tvoří především zemědělské plochy se stopami po intenzivní těžbě lignitu během 19. a 20. století.

V rámci komplexních pozemkových úprav v katastrálním území Šardice došlo v rámci plánu společných zařízení (vedle návrhu sítě polních cest) k návrhu protipovodňových a protierozních opatření v návaznosti na územní systém ekologické stability. Návrh vodohospodářských a protierozních opatření byl vytvořen na základě detailního posouzení hydrologických poměrů [2].

Vzhledem k rozsáhlosti vzniklých opatření a velikosti řešeného území byla pro prezentaci účinnosti navržených opatření vybrána jedna konkrétní lokalita s realizovanými ALS, kde je v rámci projektu TAČR TH04030409 „Agrolesnické systémy pro ochranu a obnovu funkcí krajiny ohrožované dopady klimatických změn a lidskou činností prováděn podrobnější výzkum. Modelová lokalita zahrnuje soustavu tří zasakovacích travních pásů s liniovou výsadbou dřevin střídanou dvěma pásy ze zemědělskými plodinami.

Jedná se tedy o plochu s agrolesnickým opatřením. Převládajícím půdním typem v zájmové lokalitě je černozem, tedy nejurodnější typ půdy. Toky a vodní plochy v zájmovém území spadají do oblasti povodí Moravy. Souběžně s východní hranicí zájmové lokality protéká katastrálním územím Šardický potok. Zájmová lokalita spadá do teplé a na srážky chudé klimatické oblasti.



Obr. 1 Zasakovací pásy ALS - součást protierozní ochrany v k. ú. Šardice.



Obr. 2 Zasakovací pásy ALS - součást protierozní ochrany v k. ú. Šardice.

Agrolesnická opatření

Jedním z příkladů přírodě blízkých plošných opatření pro zadržení vody v krajině jsou agrolesnická opatření, která pozitivně přispívají k omezení vzniku vodní i větrné eroze, snížení teploty, optimalizaci vlhkosti, ohumusování půdy, zvýšení biodiverzity a v neposlední řadě plní také estetickou funkci. Kořeny stromů také podporují infiltraci. Jedná se o kombinaci polního a pastevního způsobu hospodaření a výsadby dřevin za účelem zlepšení stavu krajiny s ohledem na ekologické i ekonomické faktory. Rozlišujeme základní dva typy agrolesnických systémů, tj. postupné agrolesnictví, kdy pěstujeme nejdříve dřeviny a až poté zemědělské plodiny či naopak, případně souběžné agrolesnictví, kdy pěstujeme oboje zároveň. Při souběžném pěstování obou plodin rozeznáváme liniové výsadby stromů na půdním bloku (tzv. silvoorebné systémy), pastviny obohacené

o libovolnou výsadbu dřevin (tzv. silvopastorální systémy) a tzv. výmladkové plantáže, které obsahují rychle rostoucí typy stromů [3].

Jednou ze zemí, kde je agrolesnictví běžnější součástí hospodaření, je Rakousko. Nezřídka zde najdeme kombinaci mladých dřevin v rámci silvoorebného systému s chovem zvířat, např. drůbeže. Bloky orné půdy často obsahují rozložené skupiny stromů. Dochází k souhrě pěstování ovocných stromů s travními porosty pro přežvýkavce. I zde se najde mnoho skeptických vlastníků zemědělské půdy, a to především kvůli restriktivnímu lesnickému zákonu, který legislativně přeměňuje zemědělskou půdu s určitým množstvím stromů na les [4].

3 METODIKA

Na modelových lokalitách jsou v rámci výzkumného úkolu TAČR prováděny hydropedologické analýzy porušených a neporušených půdních vzorků. Na vybrané lokalitě byl během vegetačního období proveden odběr půdních vzorků u 33 kopaných sond. V rámci každé sondy byly odebrány vzorky porušené i neporušené (do Kopeckého válečků) z hloubek 20 cm a 50 cm, pro laboratorní analýzy základních hydrofyzikálních vlastností půdy. Na modelové lokalitě bylo také v uvedených hloubkách instalováno 66 vlhkostních a teplotních čidel, které v pravidelných intervalech kontinuálně měří uvedené charakteristiky. V současné době probíhají laboratorní analýzy a vyhodnocování výsledků.

Za účelem charakteristiky vodního a vzdušného režimu půdy byl proveden rozbor neporušených půdních vzorků. Z těchto dat byla vypočtena objemová hmotnost redukovaná i neredukovaná, momentální vlhkost, nasákivost, 30' vlhkost, maximální vodní kapacita a retenční vodní kapacita. Výsledky těchto veličin jsou zatím známy pouze z prvních odběrů a budou porovnány s dalšími dosaženými výsledky z následujících termínů odběru vzorků. Z datalogerů instalovaných vlhkostních čidel jsou pravidelně stahována data.

K popisu procentuálního zastoupení částic určité velikosti v celém objemu půdního vzorku jsou prováděny rozbor zrnitostního složení půdy. Zrnitost má významný vliv na další fyzikální, chemické a biologické vlastnosti půdy a také determinuje vznik vodní případně větrné eroze. K analýzám je využita dekantační hustoměrná metoda dle A. Casagrande. Výsledkem tohoto měření jsou křivky zrnitosti pro jednotlivé sondy.

Další měřenou fyzikální vlastností půdy je nasycená hydraulická vodivost, která definuje rychlost vody protékající půdním prostředím. Je ovlivněna strukturou a texturou půdy. Nasycená hydraulická vodivost byla stanovována na odebraných neporušených půdních vzorcích pomocí permeamtru s konstantním spádem a počítána pomocí Darcyho vztahu.



Obr. 3 Odběr vzorku do Kopeckého válečku.

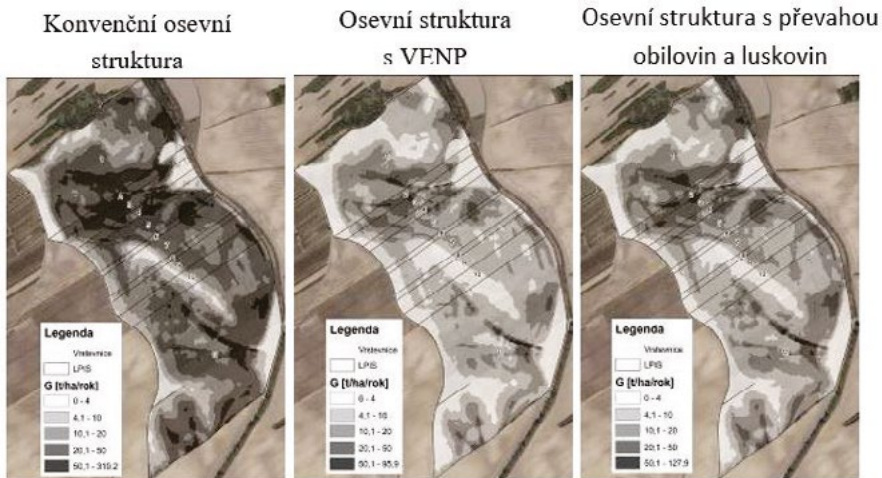
V zájmovém území byla pro zhodnocení erozních poměrů vybrána lokalita, s navrženými ALS viz obr. 4 a obr. 5. Zde byly porovnány tři hodnoty C faktoru, a to pro klimatický region ($C = 0,291$), pro vyloučení erozně nepříznivých plodin ($C = 0,12$) a pro strukturu plodin s převahou obilovin a luštěnin ($C = 0,09$). Tyto hodnoty byly implementovány na původní a aktuální stav, viz tab.1, ve které jsou uvedeny hodnoty, míry erozního ohrožení při variantním využití s porovnáním konvenčního způsobu obdělávání s aplikací agrolesnického systému (ALS).

4 VÝSLEDKY

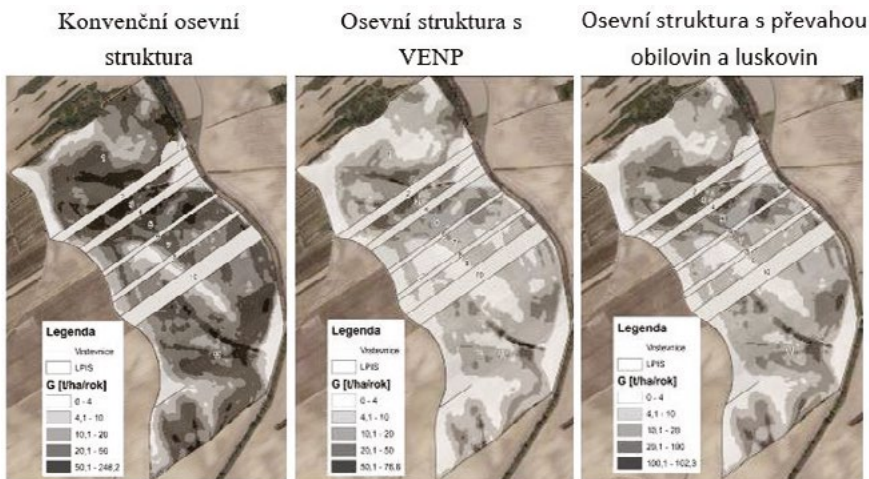
Dosažené výsledky ukazují snížení hodnot míry erozního ohrožení v důsledku snížení hodnoty C faktoru a po aplikaci systému zasakovacích pásů ALS bylo možné aplikovat také sníženou hodnotu faktoru účinnosti protierozních opatření na hodnotu $P = 0,8$. Předmětem výzkumu bude také doporučení na možnosti snížení faktoru K v případě návrhu ALS.

Tab. 1 Erozní poměry.

Plocha [ha]	Konvenční osevní struktura - 0,291		Osevní struktura s VENP - 0,12		Osevní struktura s převahou obilovin a luskovin - 0,09	
	Průměrná ztráta [t.ha ⁻¹ .rok ⁻¹]					
	Původní stav	Po návrhu ALS	Původní stav	Po návrhu ALS	Původní stav	Po návrhu ALS
18.45	18.45	24.53	12.64	10.11	9.48	7.59
3.06	3.06	40.33	20.79	16.63	15.59	12.47
4.82	4.82	21.34	11.00	8.80	8.25	6.60
4.58	4.58	18.05	9.30	7.44	6.98	5.58
3.59	3.59	14.54	7.50	6.00	5.62	4.50
29.53	29.53	19.58	10.09	8.08	7.57	6.06

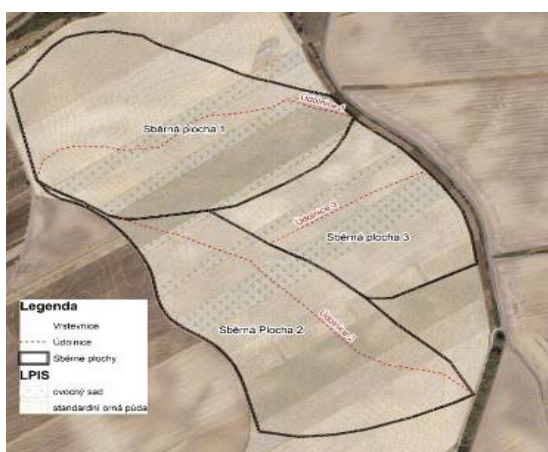


Obr. 4 Míra erozní ohroženosti před návrhem opatření.



Obr. 5 Míra erozní ohroženosti po návrhu ALS.

Pro možnost hodnocení odtokových poměrů byly na řešené modelové lokalitě určeny 3 sběrné plochy, viz obr. 6. Na těchto sběrných plochách byly provedeny variantní výpočty povrchového přímého odtoku s pomocí metody čísel odtokových křivek v modifikaci programu DesQ-MaxQ. Pro porovnání byly použity tři způsoby využití půdy, s variabilními hodnotami čísel odtokových křivek CN a to pro původní stav při pěstování širokořádkové plodiny bez ALS (v tab. 2 značené ŠŘ bez ALS), pěstování širokořádkové plodiny s aplikací ALS (ŠŘ ALS) a stav při pěstování úzkořádkové plodiny s aplikací ALS (UŘ ALS). Jednotlivé hodnoty jsou mezi sebou porovnány a zapsány v tabulce a zobrazeny pomocí hydrogramů, viz tab. 2 a obr. 7. Z tabulek i hydrogramů je patrné, že navržená opatření snížila hodnoty CN křivek s pozitivním dopadem na hodnoty přímého odtoku. Po aplikaci ALS dojde k pozitivní změně hydrologických podmínek. Tato skutečnost může být dále umocněna např. výsevem do posklizňových zbytků, či výsevem do krycí plodiny.



Obr. 6 Vymezené sběrné plochy.

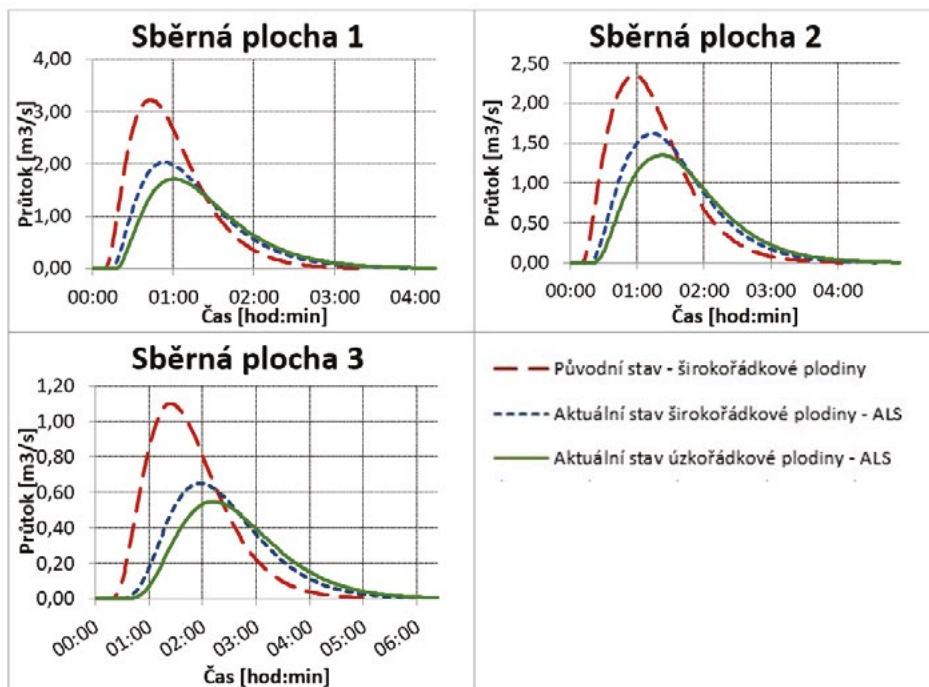
Tab. 2 Výpočty odtokových poměrů v zájmovém území.

N-leté maximální průtoky a objemy povodňových vln															Jednotky		
N	Stav	5			10			20			50			100			[roky]
		Pův.	Šírok.	Úzko.	Pův.	Šírok.	Úzko.	Pův.	Šírok.	Úzko.	Pův.	Šírok.	Úzko.	Pův.	Šírok.	Úzko.	
Sběrná plocha 1	Q_N	0.553	0.381	0.331	0.961	0.661	0.575	1.55	1.04	0.58	2.45	1.57	1.33	3.26	2.03	1.71	[m ³ .s ⁻¹]
	W_{PVT}	2.61	2.17	2.04	3.46	2.86	2.68	4.37	3.6	2.68	5.54	4.44	4.08	6.57	5.01	4.6	[10 ³ .m ³]
Sběrná plocha 2	Q_N	0.404	0.283	0.243	0.703	0.5	0.433	1.13	0.797	0.68	1.8	1.23	1.04	2.39	1.62	1.36	[m ³ .s ⁻¹]
	W_{PVT}	2.76	2.31	2.15	3.65	3.07	2.86	4.64	3.88	3.6	5.83	4.84	4.43	6.75	5.54	5.07	[10 ³ .m ³]
Sběrná plocha 3	Q_N	0.178	0.109	0.096	0.313	0.191	0.167	0.517	0.308	0.27	0.821	0.49	0.409	1.1	0.652	0.549	[m ³ .s ⁻¹]
	W_{PVT}	1.85	1.45	1.37	2.46	1.92	1.8	3.17	2.44	2.26	3.99	3.08	2.82	4.62	3.56	3.26	[10 ³ .m ³]
	$W_{PVT,1d}$	3.09	2.36	2.19	4.02	3.08	2.87	4.9	3.71	3.43	5.87	4.32	3.95	6.66	4.82	4.37	[10 ³ .m ³]

Q_N návrhový průtok (maximální průtok)

W_{PVT} objem povodňové vlny

$W_{PVT,1d}$ objem povodňové vlny vyvolaný $H_{1,N}$ (1- denní maximální srážkový úhrn pro N – 5, 10, 20, 50 a 100)



Obr. 7 Hydrogramy sběrných ploch.

5 DISKUZE

Výsledky hodnocení erozních a odtokových poměrů ukazují, že realizace agrolesnických opatření mají svůj pozitivní účinek, a to jak na snížení míry erozního ohrožení, tak i na snížení hodnot povrchového přímého odtoku. To vše ukazuje, že krajinné prvky formou ALS na orné půdě účinně omezují vznik eroze a zvyšují infiltrační schopnost půdy a krajiny. Vznik zmíněných opatření také příznivě přispěl k tvorbě krajinného rázu.

6 ZÁVĚR

Probíhající výzkum je zaměřen zejména na spojitost se základními hydrofyzikálními vlastnostmi půdy. Vzhledem k tomu, že výzkum i laboratorní práce stále probíhají, není zatím možno zveřejnit komplexní výsledky měření vlhkostních a teplotních charakteristik a hydropedologických analýz. V další etapě se kromě opakovaných měření výše zmíněných půdních charakteristik změní a vypočítají další veličiny, jako např. pórovitost, rozdělení pórů na kapilární, semikapilární a nekapilární, provzdušenost, maximální vzdušná kapacita, retenční vzdušná kapacita, aj. Budou posouzeny jednotlivé výsledky v závislosti na čase a typu opatření a bude popsán vývoj některých charakteristik v čase. Tenhle výzkum začal v letošním roce a počítá se s jeho pokračováním v dalších letech.

Poděkování

Tento výzkum je částečně financován z projektů TAČR TH04030409 „Agrolesnické systémy pro ochranu a obnovu funkcí krajiny ohrožované dopady klimatických změn a lidskou činností prováděn podrobnější výzkum a BD122001010 Účinnost přírodních opatření pro eliminaci nepříznivých důsledků hydrologických extrémů v podmínkách klimatické změny. Velké poděkování patří našemu školiteli prof. Ing. Miroslavu Dumbrovskému, CSc. za vydatnou pomoc s výzkumem a revizí článků.

Použité zdroje

- [1] JANEČEK, Miloslav. Ochrana zemědělské půdy před erozí: metodika. Praha: Powerprint, 2012. ISBN 978-80-87415-42-9.
- [2] DUMBROVSKÝ, Miroslav, Milan BILÍK a Yvona LACINOVÁ. Komplexní pozemkové úpravy v k.ú šardice etapa I: Návrh plánu společných zařízení technická zpráva. Brno, 2005.
- [3] WEGER, Jan, Bohdan LOJKA, Radim KOTRBA a Jakub HOUŠKA. Katalog přírodě blízkých opatření pro zadržení vody v krajině: Činnosti k podpoře výkonu státní správy v problematice sucho [online]. Praha, duben 2018, , 105 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: http://www.suchovkrajine.cz/sites/default/files/vystup/p1_katalog_opatreni_0.pdf
- [4] EURAF: European Agroforestry Federation [online]. Brusel [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <http://www.europeanagroforestry.eu/countries/austria>
- [5] GODINHO, Sergio, Peter SUROVÝ, Adélia SOUSA a Artur GIL. Advances in remote-sensing applications in silvo-pastoral systems [online]. 2018 [cit. 2020-12-18]. ISBN 0143-1161. Dostupné z: doi:10.1080/01431161.2018.1476012

DOPLNENIE NEMERANÝCH KONCENTRÁCIÍ PLAVENÍN

REPLENISHMENT OF UNMEASURED CONCENTRATIONS OF SUSPENDED SEDIMENTS

František Cyprich^{*,1}

*frantisek.cyprich@stuba.sk

¹Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra vodného hospodárstva krajiny, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

Abstrakt

Namerané záznamy o koncentráciách plavenín sú dôležitou informáciou na podporu vodohospodárskych aktivít, avšak často nie sú úplné a ako také nie sú vhodné pre niektoré analýzy. Tento príspevok uvádza možnosti modelovania koncentrácií suspendovaného sedimentu na ich stanovenie v obdobiach, keď sa merania nevykonávali. Ako prípadová štúdia bol vybraný profil Dunaja v Bratislave. V príspevku sú porovnávané lineárne a nelineárne modely pri riešení tejto úlohy pomocou rôznych zdrojov údajov. Získané výsledky ukazujú významné zvýšenie presnosti modelovania koncentrácií plavenín oproti štandardnej metóde, ktorou je hodnotiacia krivka. Na stanovenie koncentrácie suspendovaného sedimentu sa použilo niekoľko premenných, pretože rovnaké údaje ako v tejto štúdii nemusia byť dostupné všade.

Kľúčové slová

ECA&D, plaveniny, Dunaj

Abstract

Measured records of suspended sediment concentrations are vital information to support water management activities, however due to gaps in measurements are often incomplete, and as such, are not suitable for some analyses. This paper sets out the options for modelling suspended sediment concentrations to determine them in periods when measurements were not performed. The Danube River profile in Bratislava was selected as the case study. Linear using and not-linear models are compared in the paper to solve this task using various data sources. The results obtained show a significant increase in the precision of modelling suspended sediment concentrations over the standard method, which is a rating curve. Several variables were used to establish the suspended sediment concentration, because the same data as in this study may not be available everywhere.

Key words

ECA&D, suspended sediment, Danube

1 ÚVOD

Plaveniny sú rôzne minerálne a organické častice, ktoré sú nesené prúdiacou vodou. Pôvod týchto častíc spočíva v erozívnych činnostiach vody, vetra alebo iných síl v povodí alebo erózii priamo v koryte rieky. Častice nesené vodou sa kategorizujú buď ako splaveniny, čo sú hrubozrnné častice, ktoré sa valia a pohybujú sa po dne koryty rieky, alebo plaveniny, ktoré sú jemnozrnnými časticami, ktoré sa prenášajú ako súčasť tečúcej vody [1].

Presné veľkostné rozhranie medzi splaveninami a plaveninami nie je možné určiť. Jedným z dôležitých rozdielov medzi týmito dvoma kategóriami je rýchlosť ich pohybu. Splaveniny sa pohybujú pomalšie ako prúd, ktorý ich unáša po dne a rýchlosť pohybu plavenín je približne rovnaká ako rýchlosť prúdu. Kvantifikácia plavenín podporuje vyhodnotenie rozsahu erózie procesov v povodiach a predikciu ich vplyvu na vodných dielach [2] a nádržiach, alebo na prepravu vo vodnom toku. Musí sa preto kvantifikovať množstvo plavenín v riekach a sú potrebné informácie o tom, ako sa v priebehu času vyvíja transport sedimentov. 85 % až 95% predstavuje množstvo plavenín z pevných látok prepravovaných tokmi [3], [4], preto sa im venuje aj táto práca.

Najčastejšie sa pre kvantifikáciu plavenín používa merná krivka sedimentov, ktorá určuje závislosť medzi hlavnou ovplyvňujúcou premennou – prietokom vody v danom profile a prietokom alebo koncentráciou plavenín

(rating curve). Základom aj najspôhlivejším spôsobom bilancovania predchádzajúcich alebo odhadu budúcich údajov o kvantite plavenín je využitie záznamov z meraní. Odber vzoriek plavenín je však pomerne náročný ak sa má naozaj reprezentatívne určiť a vyžaduje skúsených odborníkov. Dôvodmi sú napríklad výrazné rozdiely plavenín po profile rieky [5] a podobne. Navyše je to činnosť časovo náročná a tým aj pomerne nákladná, takže nie vždy sú merania každodenné a následne nie sú z minulosti dostupné súvislé denné údaje vhodné pre ďalšie analýzy [3], [6], čo je aj prípad tu riešenej prípadovej štúdie.

V tomto článku je popísané posúdenie možnosti doplnenia chýbajúcich údajov o plaveninách pomocou štatistických metód a pomocou metód umelej inteligencie. Prípadová štúdia sa riešila na rieke Dunaj v meracom profile v Bratislave most Lafranconi. V tejto lokalite vykonáva merania plavenín Výskumný ústav vodného hospodárstva (VÚVH) systémom občasných meraní (väčšinou vždy niekoľko krát do mesiaca podľa prietokovej situácie na Dunaji). VÚVH poskytol koncentrácie plavenín, ktoré stanovil ako podiel suchej hmotnosti plavenín ku celkovej hmotnosti zmesi vody a plavenín a bez presnejších informácií o plaveninách. Vzhľadom na nevykonávanie denných meraní je ich interpolovanie užitočné a pomôže dáta využiť pre ďalšie analýzy. Pre tento účel sa v práci testujú regresné metódy strojového učenia a umelej inteligencie.

2 POUŽITÉ ÚDAJE

Pri regresných metódach, ktoré boli použité pre riešenie úlohy sú potrebné hodnoty závislej, počítanej veličiny, ktorou je koncentrácia plavenín v profile mostu Lafranconi nepravidelne meraná inštitúciou VÚVH a viaceré nezávislé premenné, a to koncentrácie plavenín v iných profiloch Dunaja a Moravy a prietoky. V profile mostu Lafranconi boli nepravidelné merania. Od roku 2008 ohraničeného začiatkom merania v tomto profile po koniec roku 2015 údajmi z rakúskej stránky sú merané koncentrácie len v 496 dňoch. Prietoky sú najdôležitejšou nezávislou premennou pri výpočte plavenín. Pri metóde mernej krivky plavenín sa vychádza iba z prietoku v tej istej stanici.

Príprava údajov

Medzi najdôležitejšie kroky pri riešení regresných problémov metódami strojového učenia patrí analýza a príprava vstupov, ktoré budú použité pri riešení daného problému. Údaje boli rozdelené na tréningové a testovacie.

Koncentrácie sa budú používať vo výpočtoch ako závislá premenná – koncentrácie plavenín v profile Lafranconi a zvyšné údaje sa budú v niektorých výpočtoch používať ako nezávislá premenná. Pre túto skupinu premenných možno predpokladať, že koncentrácia v profile Lafranconi môže byť funkciou koncentrácie plavenín v predchádzajúcich staniaciach a v predchádzajúcich časových krokoch (dňoch). Pomocou korelácie plavenín z rôznych staníc a to aj z predchádzajúcich dní a koncentrácie plavenín v cieľovom profile Lafranconi môžeme vidieť vysokú koreláciu koncentrácií v Lafranconi s koncentraciami v Hainburgu, v predchádzajúcom dni v Hainburgu v Komárne v nasledujúci deň a v Medved'ove. Údaje z nasledujúcich dní môžeme v tejto úlohe použiť, keďže nejde o predikciu, kde by boli údaje z nasledujúcich dní neznáme ale o interpolačnú úlohu, v prípade ktorej sú tieto údaje známe.

Aj pre prietoky možno predpokladať, že koncentrácia v profile Lafranconi môže byť funkciou prietokov v predchádzajúcich staniaciach a v predchádzajúcich časových krokoch. V zmysle regresnej závislosti môže byť v prípade interpolácie aj funkciou prietoku v dolných staniaciach, prípadne aj v dolných staniaciach v nasledujúcom časovom kroku. Najvyššia korelácia plavenín je s prietokom vo vyššie položennej stanici Fischamend, Hainburg a s prietokom vody v stanici Devín.

3 METODIKA

Na modelovanie koncentrácií plavenín boli použité rôzne typy lineárnych modelov a modelov strojového učenia. Lineárne metódy majú výhodu lepšej interpretovateľnosti a jednoduchšieho použitia a metódy strojového učenia môžu v prípade úloh s nelineárnym charakterom spresniť výsledky. Použili sme viacero modelov obidvoch druhov, avšak hlavne sme sa zamerali na testovanie rôznych zostáv vstupných údajov do výpočtov. V tomto príspevku sme sa zamerali na testovanie koncentrácií plavenín pomocou všetkých dostupných prietokov a pomocou meraných koncentrácií v predchádzajúcej stanici Hainburg. Na výpočty bolo použitých 10 modelov na porovnanie s štandardným modelom "rating curve". Všetky výpočty boli urobené pomocou programovacieho jazyku R v programe RStudio.

Rating curve

Rating curve, alebo merná krivka koncentrácií v závislosti na prietoku je štandardne používaný model pre výpočet koncentrácií plavenín (alebo prietoku plavenín). Je to nelineárna závislosť, t.j. vysvetľovaná premenná a vysvetľujúce premenné (prediktory) sú prepojené cez známu nelineárnu funkciu, ktorou je mocninová funkcia. Takéto riešenie vedie k nelineárnemu regresnému modelu. Závislosť prietokov a plavenín sa teda vyhodnocuje cez funkciu $C = aQ^b$, kde C je koncentrácia plavenín a Q je prietok. Logaritmovaním tejto závislosti dostávame $\log(C) = b \cdot \log(Q) + a$, čo je lineárna rovnica, ktorá sa síce rieši jednoduchšie, avšak tým, že nepoužíva priamo tieto dve veličiny ale ich logaritmy sa výsledok horšie interpretuje. V práci sme preto používali prvý uvedený tvar tejto závislosti. Výsledky z tohto modelu slúžia ako porovnávacie kritérium, nakoľko pokiaľ by sme navrhovanými metódami nedosahovali vo výpočtoch vyššiu presnosť, nemali by tieto metódy žiadny praktický prínos.

Lineárne modely

Najpoužívanejším modelom pre regresnú analýzu je lineárna regresia, v prípade viacerých vysvetľujúcich premenných viacnásobná lineárna regresia. Lineárna regresia sa používa na predikciu hodnoty výstupnej premennej Y na základe jednej alebo viacerých vstupných vysvetľujúcich premenných X . Pri tvorbe modelu je cieľom vytvoriť lineárny vzťah (matematický vzorec) medzi premennou X a Y . Dôležitou podmienkou je aby vstupné údaje medzi sebou príliš nekorelovali (multikorelácia), k čomu môže pri tejto úlohe prísť. Takejto situácii je možné zabrániť tzv. regularizáciou regresnej metódy. Za účelom regulovať lineárnu regresiu vznikla metóda penalizovanej regresie, ktorá z lineárnej regresie vychádza, ale obsahuje navyše parametre. Používať budeme tzv. „LASSO penalizáciu“ a „ridge penalizáciu“. Účelom takéhoto regulovania je zabránenie vzniku chybného modelu v dôsledku kolinearit, napr. pri vysokom počte premenných. Vďaka LASSO regularizácii sa niektoré koeficienty vynulujú. Vznikne jednoduchší model s menej premennými, v ktorom sa eliminuje multikolarita a ktorý zvyčajne lepšie generalizuje. Ridge regresia je podobná, len v nej použitý regularizačný/penalizačný mechanizmus má snahu znižovať veľkosti koeficientov pri vysvetľujúcich premenných, čím prípadné nepravidelnosti v údajoch, nespôsobia radikálne nezvyklé výstupy. Toto vedie k zvyčajne lepším výsledkom na údajoch, ktoré neboli použité pri tvorbe modelu (čo je cieľom dobrej regresnej analýzy).

Ďalšou metódou v tejto práci je regresia pomocou hlavných komponentov. Analýza hlavných komponentov je matematická štatistická metóda, ktorá prevádza pôvodné premenné, ktoré môžu byť korelované, na také, ktoré sú lineárne nekorelované. Tieto sa potom označujú ako hlavné komponenty a sú to v podstate lineárne kombinácie pôvodných premenných, ktoré zachovávajú čo najväčšie množstvo informácií o pôvodných premenných a zároveň počet takto vzniknutých (skombinovaných) premenných je menší alebo najvyšš rovný ako počet pôvodnej množiny premenných. Namiesto regresii vykonanej s pôvodnými premennými sa výpočet závislej premennej vykoná s hlavnými komponentami. Pointou teda je, že napríklad 5 hlavných komponentov môže vysvetliť až 99% variácie v závislej premennej X . To znamená, že na výpočet nepotrebujeme povedzme 40 radov čísel ale stačí nám napríklad spomínaných 5. Jednoduchšie modely lepšie generalizujú, takže pri úlohách s mnohými korelujúcimi premennými často dostaneme lepšie výsledky na testovacích údajoch.

Posledná z tohto typu metód je viac algoritmus, než matematicky inak definovaná regresia, ide o tzv. „best subsets“ regresiu, kde najlepšou podmnožinou sa myslí podmnožina vysvetľujúcich premenných, ktorých použitie v regresnej rovnici vedie k najlepšiemu výsledku, čo sa zisťuje pomocou napríklad Akaikeho kritéria na tréningových dátach. V úlohe, ktorú v tejto práci riešime je často možných kombinácií premenných príliš veľa a používajú sa preto rôzne techniky hľadania najvhodnejšej kombinácie premenných ako je napríklad dopredná alebo spätná selekcia premenných do hľadanej optimálnej rovnice. Použitý bol balík programu R *leaps*, ktorý umožňuje riešiť túto úlohu.

Nelineárne modely

Support Vector Machines (skr. SVM) je algoritmus vykonávajúci najmä klasifikáciu, ale aj regresnú analýzu. Použitie tzv. podporných vektorov znamená, že iba časť vstupných údajov (vektorov) sa použije pri jeho budovaní. Navyše využíva myšlienku tzv. jadra (kernel), pomocou ktorého sa nelineárny výpočet zjednodušuje a premieta do lineárneho priestoru, čím sa úloha zjednodušuje. Pri učení SVM sa musia naladiť rôzne parametre.

Ďalšou použitou metódou sú náhodné lesy (Random Forest). Tento je súborom väčšieho množstva tzv. regresných stromov. Regresný strom je viacstuňový algoritmus, ktorý rozhoduje o hodnote určitej veličiny. Obsahuje vnútorné a koncové uzly. Pri každom vnútornom uzle stromu prebieha binárne rozhodnutie na základe hodnoty niektorej z vysvetľujúcich premenných (alebo na základe viacerých hodnôt) a podľa odpovede áno alebo nie, vyberieme ľavý resp. pravý uzol. To sa opakuje dovtedy, kým sa nedostaneme k jednému koncovému uzlu s hodnotou závislej premennej, ktorú chceme určiť. Náhodný les je kolekciou takýchto stromov, pričom do rastu stromov je vnesená náhodnosť a to tak, že v každom uzle stromu sa náhodne vyberie iba selekcia vysvetľujúcich

premenných. Výsledná hodnota závislej premennej sa získa priemerovaním hodnôt, ktoré vypočíta každý strom. Výsledky metódy sa vyznačujú vysokou presnosťou, dobrou generalizačnou schopnosťou, malou náchylnosťou na pretrénovanie a pomerne jednoduchým ladením vnútorných parametrov.

Extreme Gradient Boosting (skr. XGBoost), a je to algoritmus založený na tzv. posilňovaní. Je tiež ensembleovou metódou zvyčajne využívajúcou plytké regresné stromy ako Random Forest. Rozdiel je, že ide o postupné učenie sa stále nových modelov (nie paralelne, ako v prípade RF). Hlavnou myšlienkou je, že dobrý prediktívny model sa dá získať postupne vylepšenými aproximáciami. XGBoost vyhodnotí presnosť modelu v predchádzajúcom štádiu a potom vyvinie ďalší model, ktorý sa sústreďuje hlavne v predchádzajúcom modeli na nesprávne vypočítané vzorky. Takéto „zosilňovanie“ pokračuje, kým sa nedosiahne požadovaná úroveň presnosti. V tejto práci bol použitý balík pre softvér R *xgboost*.

Posledné dva modely využívajú rámec strojového učenia h2o. H2o je otvorená platforma, charakteristická škálovateľnosťou pre rôzne veľké modely. H2o podporuje najpoužívanejšie štatistické algoritmy a algoritmy strojového učenia vrátane XGBoost, algoritmov hlbokého učenia, náhodných stromov a ďalších. H2o má tiež špičkovú funkčnosť AutoML, ktorá automaticky prechádza všetkými algoritmi a ich hyperparametrami, aby vytvorila rebríček najlepších modelov a následne ensembleový model typu stacking, čo znamená, že vyberie najlepšie modely a pomocou ich výsledkov, t.j., nie pomocou pôvodných údajov natrénuje koreňovým modelom výsledok. Platformu H2o používa na celom svete viac ako 18 000 organizácií a je mimoriadne populárna v komunitách softvérov R a Python. V práci sme využili z tejto platformy model Deep Learning Neural Network a spomenutý stacking ensemble.

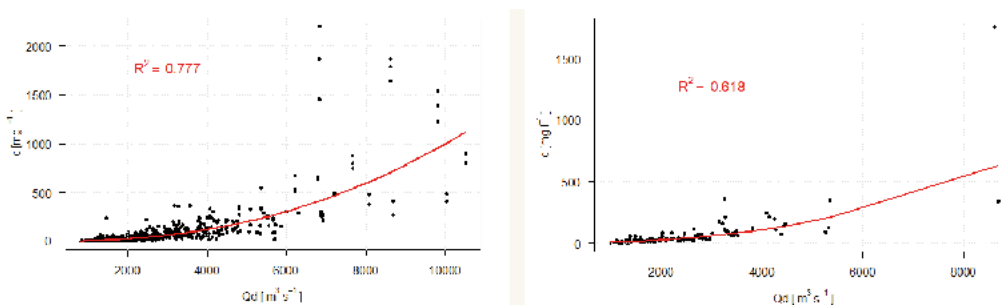
4 VÝSLEDKY

Vzhľadom na to, že vykonaných výpočtov bolo pomerne veľké množstvo, snažili sme sa v tejto časti kvôli prehľadnosti zahrnúť iba ich reprezentatívnu časť. Aj keď bolo použitých viacero modelov, zámerom tejto práce bolo skôr vyhodnotiť výstupy z pohľadu údajov použitých pri kalibrácii jednotlivých modelov, a preto sú nasledujúce podkapitoly organizované v tomto zmysle. V tabuľkách sú zobrazené len najlepšie výsledky modelov podľa štatistických indikátorov: ME - stredná chyba, MAE - stredná absolútna chyba, RMSE - stredná kvadratická chyba, PBIAS - percentuálna priemerná odchýlka, NSE - koeficient Nash-Sutcliffe, r - Pearsonov koeficient korelácie, R2 - koeficient determinácie.

Výpočet pomocou mernej krivky koncentrácie plavenín (rating curve)

Výpočet pomocou rating curve je štandardná metóda pre výpočet koncentrácie alebo prietoku plavenín. V tejto práci má jej výpočet a vyhodnotenie za účel stanoviť minimálnu úroveň presnosti, od ktorej má zmysel použitie zložitejších regresných modelov.

Na Obr. 1 je ilustrovaný výpočet závislosti medzi prietokom v Bratislave a koncentráciou plavenín. Vľavo je demonštrovaný výsledok z výpočtu nelineárnej regresie pomocou všetkých údajov. Zo všetkých údajov sa aj určil koeficient determinácie medzi vypočítanými a nameranými údajmi. Na pravom obrázku sa na tvorbu modelu použili iba údaje z kalibračného/trénovacieho obdobia a koeficient determinácie medzi vypočítanými a mieranými hodnotami sa určil iba na základe testovacieho súboru. Druhý spôsob je správny, pretože pri prvom postupe nevieme ako bude model počítat nové údaje, teda údaje o koncentráciách, ktoré skutočne nemáme. Ďalšie štatistické indikátory tohto modelu (na testovacích údajoch) sú v nasledujúcej tabuľke. S týmito hodnotami je potrebné porovnávať úspešnosť ďalších modelov.



Obr. 1 Porovnanie tvorby „rating curve“ na všetkých a iba na kalibračných (trénovacích) údajoch.

Tab. 1 Vyhodnotenie modelu „rating curve“ na testovacích údajoch.

ME	MAE	RMSE	PBIAS	NSE	r	R2
-16,179	39,218	140,822	-19,3	0,545	0,817	0,668

Výpočet so všetkými prietokmi

Na Dunaji nad skúmaným profilom Lafranconi je viacero meracích staníc prietokov, avšak aby sa výpočty nekomplikovali prílišnou multikolaritou, boli zahrnuté iba stanice Hainburg a Fischamed. Vzhľadom na ich polohu, existujúce vodné stavby medzi Bratislavou a týmito stanicami ich považujeme za dostatočne reprezentatívne. V každom výpočte boli použité prietoky z daného dňa aj prípadné predchádzajúce dni.

Pre výpočty boli použité viaceré modely s veľmi dobrými výsledkami a to ako lineárne tak aj najzložitejší použitý model strojového učenia z platformy h2o využívajúci „stacking regression“, ktorý dosiahol najlepšie výsledky. Z lineárnych modelov poskytuje najlepšie výsledky best subset regresia, pri ktorej sa uplatňuje interakcia premenných. „Best subset“ regresia hľadá najvhodnejšiu podmnožinu premenných pre výpočet závislej premennej.

Tento model sme uviedli vzhľadom na jeho dobrú interpretovateľnosť a jednoduché získanie upresnených koeficientov v prípade zmeny údajov. Tieto sa môžu trochu zmeniť napríklad ak sa na základe tohto testovania rozhodneme vytvoriť konečný model pre interpoláciu (modelovanie) koncentrácií v Lafranconi z kompletných údajov, ktoré sú v súčasnosti k dispozícii. Vybrané - najlepšie modely sú vyhodnotené v nasledujúcej Tab. 2. Uvádzame v nej aj či bola v danom výpočte použitá interakcia premenných, nakoľko výpočty s interakciou a bez interakcie majú niekedy veľmi rozdielnu presnosť. Ako príklad je na začiatku tabuľky uvedený model LASSO v oboch verziách.

Tab. 2 Vyhodnotenie testovania výpočtu koncentrácie z prietokov.

	ME	MAE	RMSE	PBIAS	NSE	r	R2
LASSO bez interakcií	-17,594	45,059	144,741	-21,000	0,520	0,824	0,680
LASSO s interakciami	-11,208	29,393	101,692	-13,400	0,763	0,906	0,821
Best subset s interakciami	-10,606	29,232	96,327	-12,700	0,787	0,904	0,818
Regresia s hlavnými komponentami s interakciami	-6,653	30,619	97,297	-7,900	0,783	0,890	0,792
SVM s interakciami	-16,644	29,503	111,212	-19,900	0,716	0,897	0,804
Stacking model h2o	-4,831	34,942	79,916	-5,800	0,854	0,926	0,857

Výpočet pomocou koncentrácií z meraní v Hainburgu

V prípade interpolácií koncentrácií práve v profile Lafranconi je výhoda v tom, že koncentrácie sú merané aj vyššie v blízkom Hainburgu. Dá sa predpokladať, že regresné modely budú v tomto prípade pracovať s vysokou presnosťou, ako je aj uvedené v Tab. 3. Používali sa aj koncentrácie z predchádzajúceho dňa.

Tab. 3 Vyhodnotenie testovania výpočtu koncentrácie z koncentrácií z Hainburgu.

	ME	MAE	RMSE	PBIAS	NSE	r	R2
Lineárna regresia iba na základe koncentrácie z Hainburgu	-3,273	23,38	84,56	-3,9	0,836	0,936	0,877
Support Vector Machines (použitá je aj koncentrácia z predchádza. dňa)	-1,128	21,85	78,13	-1,3	0,860	0,937	0,878

5 ZÁVER

V tejto práci boli študované možnosti modelovania koncentrácie plavenín v profile Lafranconi na Dunaji pre účel ich interpolácie, t.j. pre ich stanovenie v dňoch, v ktorých neboli merania vykonávané. V práci bolo potvrdené, že výpočet koncentrácie plavenín je možné v porovnaní so štandardnou metódou „rating curve“ veľmi zásadne upresniť pri použití rôznych zdrojov údajov a rôznych regresných metód a metód strojového učenia. Najpresnejšie výsledky poskytujú výpočty, ktoré používajú merania z blízkej stanice Hainburg. Keďže sme sa snažili urobiť

prácu so všeobecnejšími poznatkami a taká situácia ako je blízkosť meracích miest plavenín Hainburg a Lafranconi je zriedkavá, boli vykonané výpočty aj bez týchto údajov, a to na základe iných údajov o prietokoch. Keďže ide o regresný problém, je treba použité modely kalibrovať, a to na údajoch, ktoré boli namerané.

Údaje, ktoré boli k dispozícii sa rozdelili na tréningové (kalibračné) na základe ktorých sa budovali modely a testovacie, ktoré slúžili na ohodnotenie výpočtu. Vždy sa používali tréningové a testovacie údaje z tých istých dní. Presnosť výpočtu je uvedená v tabuľkách v predchádzajúcej kapitole. Tu len zosumarizujeme výsledky z pohľadu koeficientu determinácie testovaných údajov (udáva percento variability vysvetlenej modelom – uvádzame desiatinné číslo). Pôvodný model rating curve $R^2 = 0,668$, najlepší výpočet s prietokmi $R^2 = 0,857$, najlepší výsledok pri použití koncentrácie plavení v Hainburgu $R^2 = 0,878$. Ide teda o významný nárast presnosti výpočtov. Najúspešnejšie modely bola metóda optimalizujúca zostavu prediktorov v lineárnej rovnici („best subset regression“) a modely strojového učenia Support Vector Machines a ensembleový model „Stacking Ensemble h2o“, ktorý obsahuje umelé neurónové siete („Deep Learning Neural Networks“) a iné, v súčasnosti jedny z najpreferovanejších modelov strojového učenia.

Použité regresné modely ako napr. „best subset regression“, modely strojového učenia a ensembleový model „Stacking Ensemble h2o“ poskytujú lepšiu presnosť pri interpolovaní chýbajúcich údajov koncentrácie plavenín v nameraných dňoch ako štandardný model hodnotiaceho krivka. Tieto výsledky môžu pomôcť pri doplňovaní koncentrácií plavenín na iných tokoch a ďalších analýzach ako napr. stanoveniu eróznej činnosti medzi stanicami meranými koncentrácie plavenín.

Podakovanie

Táto práca vznikla prostredníctvom finančnej podpory projektu vo Vedeckej grantovej agentúre MŠVVaŠ SR a SAV, grant č. 1/0665/15.

Použité zdroje

- [1] ROUSHANGAR, Kiyoumars & SHAHNAZI, Saman. Prediction of sediment transport rates in gravel-bed rivers using Gaussian process regression. *Journal of Hydroinformatics*, 2020, 22(2), s. 249-262.
- [2] XU, Haowen, MUSTE, Marian & DEMIR, Ibrahim. Web-based geospatial platform for the analysis and forecasting of sedimentation at culverts. *Journal of Hydroinformatics*, 2019, 21(6), s. 1064-1081.
- [3] WALLING, E. Des & FANG, D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and planetary change*, 2003, 39(1-2), s. 111-126.
- [4] BABIŃSKI, Zygmunt. 2005. The relationship between suspended and bed load transport in river channels. In: WALLING, Des E. a Arthur J. HOROWITZ. *Sediment Budgets 1: Proceedings of symposium S1 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly* [online]. Foz do Iguaçu, Brazil: IAHS Publ. 291, s. 182-188 [cit. 2020-09-13]. ISBN 1-901502-87-2.
- [5] MORRIS, L. Gregory & Fan, Jiahua. 1998. *Reservoir Sedimentation Handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use* [online]. New York: McGraw-Hill [cit. 2020-09-11]. ISBN 0-07-043302-X.
- [6] MELESSE, M. Assefa, AHMAD, Sajjad, McCLAIN, E. Michael, WANG, Xixi & LIM, Yeo Howe. Suspended sediment load prediction of river systems: An artificial neural network approach. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(5), s. 855-866.

PRŮBĚH DLOUHODOBÉHO TESTU DENITRIFIKACE

PROCESS OF LONG DENITRIFICATION TEST

Kristína Pániková^{*,1}

*Kristina.Panikova@vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie, Žižkova 17, 602 00 Brno

Abstrakt

Denitrifikační bioreaktory slouží k odstranění dusičnanů ze smyčů v zemědělských oblastech, které by se jinak prostřednictvím povrchového odtoku z těchto polí dostaly do vodních toků. Průběh denitrifikačního procesu a jeho rychlost je ovlivněna řadou faktorů. Významným faktorem je kvalita vody přitékající do denitrifikačního bioreaktoru, která je znečištěna kromě dusičnanů i jinými polutanty, jako jsou pesticidy.

Byla navržena a optimalizována metodika dlouhodobého testování vlivu pesticidních látek na průběh denitrifikace. Navržený jednorázový test umožňuje vyhodnotit inhibici denitrifikační rychlosti. Byla provedena optimalizace dávky dusičnanů (15 mg/l), způsob dávkování a nejpříznivější koncentrace NaHCO₃ (0,5 g/l) v deionizované vodě.

Klíčová slova

Inhibice denitrifikace, denitrifikační bioreaktory, topolové hobliny

Abstract

Denitrifying bioreactors are used to remove nitrates from surface runoff in agricultural areas and thus to prevent them from entering surface water bodies. The course and rate of the denitrifying process is influenced by many factors. One of the most important ones is the inflow water quality, as the water can be contaminated also by pollutants such as pesticides.

We have paper proposed and optimized a methodology for the long-term testing of the effect of pesticides on the denitrification process. This batch test was performed to evaluate the inhibition of the denitrification rate. Apart from optimizing the nitrate dosage method, we determined as well their optimal dose (15 mg/l) and also the most suitable NaHCO₃ concentration in the deionized water (0.5 mg/l).

Key words

Inhibition of denitrification, denitrifying bioreactors, poplar wood shavings

1 ÚVOD

V dnešní době způsobují některé činnosti spojené s hnojením dusíkem v zemědělských oblastech zvýšené koncentrace dusičnanů v povrchových a podzemních vodách [1]. Dusičnany patří mezi migrační formu dusíku, která se snadno hromadí v přírodních vodách, což vede ke zhoršení kvality vody [2], [3]. Výsledkem je eutrofizace, rozkvet toxických řas, ztráta biodiverzity a kontaminace pitné vody. K odstraňování NO₃ z vody jsou široce používány bioreaktory na bázi dřevní štěpky [1].

Denitrifikační bioreaktory jsou relativně jednoduchou pasivní technologií [4], jedná se o účinnou metodu pro odstraňování dusičnanů z podzemních vod a odtoků ze zemědělsky obhospodařovaných ploch. Denitrifikační bioreaktory jsou v podstatě kontejnery naplněné různými typy pevných organických látek, nejčastěji dřevní štěpkou [5]. Tato metoda je založena na anaerobní redukci dusičnanů heterotrofními bakteriemi a používá pevný zdroj organického uhlíku pro růst denitrifikačních bakterií [6]. Dřevní štěpka je nejběžnější a neúspěšnější používaným zdrojem uhlíku v mnoha studiích, kvůli její vysoké hodnotě propustnosti, nízkým nákladům na materiál, vysokému poměru C/N a dlouhodobé odolnosti [1]. Průběh denitrifikace s náplní z dřevní štěpky je významně ovlivněn typem zdroje uhlíku, teplotou, pH a rozpuštěným kyslíkem [7], [8].

Ze zemědělsky obhospodařovaných ploch odtéká voda, která je kontaminována nejen dusičnany, ale také dalšími polutanty. Dle Schulze [9] se odhaduje, že 10% pesticidů, které byly aplikovány na půdu, zasahují necílové oblasti, zejména však oblasti podél polí. Odhadované hodnoty ztrát jsou však podmíněné počasím [10]. Přítomnost

pesticidů v ekosystémech má nepříznivé účinky, které se liší v závislosti na koncentraci kontaminantu, množství a době expozice [11], [12]. Je proto logické položit si otázku, zda tyto látky nenarušují denitrifikační proces a do jaké míry jsou technologií denitrifikačních bioreaktorů odstraňovány z kontaminované vody. Denitrifikace může podporovat biodegradaci pesticidů. To bylo prokázáno u atrazinu [13] a chloracetanilidových pesticidů [14].

Cílem výzkumu je proto navrhnout metodiku pro studium osudu vybraných pesticidů v průběhu denitrifikace, zejména jejich biotransformace a adsorpce na náplň reaktoru a vliv na denitrifikační proces. Studie se zabývá návrhem dlouhodobého testu a optimalizací jednotlivých parametrů, jako jsou počáteční koncentrace N-NO_x, množství a způsob dávkování roztoku KNO₃ pro udržení příznivé koncentrace dusičnanů a také potřebnou dávkou NaHCO₃.

2 METODIKA

Princip a provedení testu

Jednorázový laboratorní test byl simulován ve 2 litrové lahvi, která slouží jako modelový denitrifikační bioreaktor. Bylo použito 12 lahví, kde každá láhev obsahovala 25 g topolových hoblin, frakce 1,0–1,5 cm a 2000 ml deionizované vody obohacené o KNO₃ a NaHCO₃. Pro vytvoření anoxického prostředí se láhev probublala argonem, až koncentrace O₂ klesla pod 0,5 mg/l. Láhve se následně uzavřeli a inkubovali v termostatu při T = 20 °C bez přístupu světla.

Pokus byl ukončen v dílčích inkubačních dobách vždy ve třech lahvích po 7, 14, 21 a 28 dnech, všechny vzorky byly po ukončení zpracovány pomocí následujících postupů. Byly změřeny hodnoty pH, O₂, CHSK_{Cr}, P_C, N-NH₄, N-NO₂ a koncentrace N-NO_x. Po změření koncentrace N-NO_x v každé ze tří lahví byl výpočtem stanoven průměr. Na základě stanoveného průměru koncentrace N-NO_x, byla vypočtena dávka roztoku KNO₃ (10 000 mg/l), tak aby byla koncentrace dusičnanů identická s počáteční hodnotou. Určená dávka roztoku KNO₃ byla nadávkována do zbývajících lahví, které se poté uložily do termostatu.

Průběh denitrifikace je hodnocen na základě inhibice denitrifikační rychlosti, která je vypočtena jako množství odstraněného dusičnanového dusíku za časovou jednotku.

Pro stanovení vybraných ukazatelů byly použity následující analytické metody. Hodnoty pH a O₂, byly měřeny pomocí multimetru Hach HQ40D (Loveland, Colorado, USA). CHSK_{Cr} byla stanovena semi-mikrometodou s dichromanem draselným v kyselém prostředí a výpočet byl proveden na základě rozdílu intenzity zbarvení při 445 nm. Celkový fosfor P_C byl měřen spektrofotometricky s molybdenovou modří, při vlnové délce 690 nm. Analýza N-NH₄ byla změřena spektrofotometricky pomocí Nesslerova činidla, při vlnové délce 425 nm. N-NO₂ byly stanoveny spektrofotometricky s α – naftolem, na základě rozdílu intenzity zbarvení při 515 nm. Stanovení N-NO_x bylo provedeno pomocí absorpční UV metody na optické sondě Nitratx plus se Sensor (Loveland, Colorado, USA).

Vstupní koncentrace N-NO_x

S ohledem na přírodní podmínky a předchozí provedené pokusy [15] byli zkoušeny vstupní koncentrace N-NO_x 15 mg/l a 30 mg/l. Tyto počáteční koncentrace jsou vhodné pro udržení denitrifikačních podmínek pokusu po dílčí inkubační dobu sedmi dnů. Zvolené koncentrace byly odzkoušeny paralelně podle navržené metodiky.

Dávka NaHCO₃, pH

Byl zkoumán vliv dávky hydrogenuhličitanu sodného na rychlost denitrifikace. Vstupní parametry testu byly 25 g topolových hoblin, frakce 1,0–1,5 cm, koncentrace N-NO_x 15 mg/l. Zkoušené dávky NaHCO₃: 0 g/l, 0,5 g/l, 1 g/l a 2 g/l. Každá dávka byla ve třech opakováních a po dílčích inkubačních dobách byly ve všech lahvích změřeny vybrané parametry a pokus se neukončoval. Pipetou bylo odebráno z každé lahve 25 ml vzorku pro stanovení N-NO_x. Dále byly změřeny vybrané parametry a to pH, koncentrace O₂ a CHSK_{Cr}. Do každé lahve bylo nadávkováno potřebné množství roztoku KNO₃ stanovené výpočtem, tak aby byla koncentrace N-NO_x 15 mg/l. Po stanovení a nadávkování roztoku KNO₃ byly lahve znovu uzavřeny a inkubovány v termostatu při T = 20 °C bez přístupu světla.

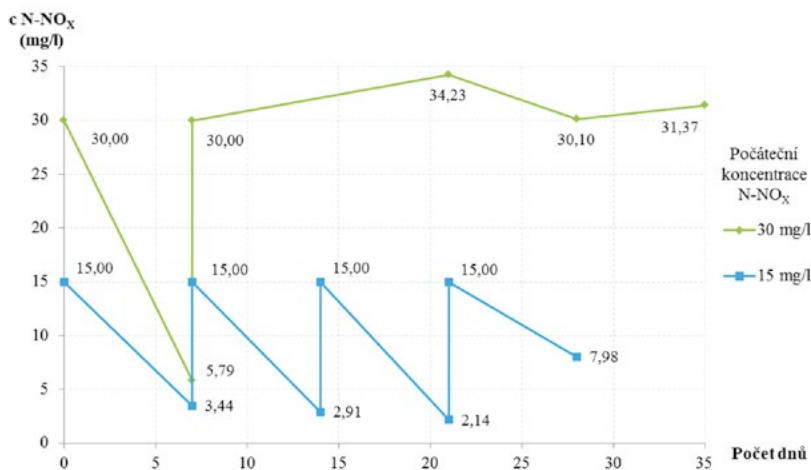
3 VÝSLEDKY A DISKUZE

Vstupní koncentrace N-NO_x

Na Obr. 1 je znázorněno srovnání dvou testovaných koncentrací N-NO_x, 15 mg/l a 30 mg/l. Při počáteční koncentraci 30 mg/l probíhala denitrifikace kontinuálně do konce první inkubační doby (sedm dní). Po nadávkování roztoku KNO₃ vzrostla hodnota koncentrace N-NO_x na 30 mg/l. Při měření po dalších inkubačních dobách byly hodnoty koncentrace N-NO_x nad hodnotu 30 mg/l. Průměrná denitrifikační rychlost se snížila z hodnoty 3,46 mg/l/d na 0 mg/l/d, proces denitrifikace se zastavil.

Při testování koncentrace 15 mg/l N-NO_x, probíhal denitrifikační proces s minimálními změnami denitrifikační rychlosti i po nadávkování roztoku KNO₃ každý týden. V průběhu měření se průměrná rychlost denitrifikace po dílčích inkubačních dobách zvyšovala, z 1,65 mg/l/d na hodnotu 1,84 mg/l/d. V posledním týdnu pokusu byla naopak nejnižší 1,00 mg/l/d.

Koncentrace kyslíku na konci testů byla u koncentrace N-NO_x 15 mg/l $0,54 \pm 0,06$ mg/l a u 30 mg/l mírně vyšší $0,58 \pm 0,12$ mg/l. CHSK_{Cr} v průběhu testů se výrazně neodlišovala, naměřené hodnoty byly v rozmezí od 90 do 370 mg/l.

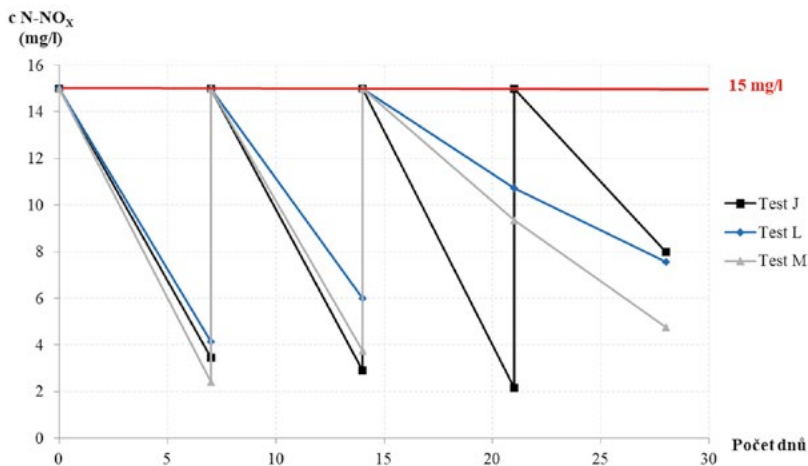


Obr. 1 Srovnání průběhů denitrifikace s počáteční koncentrací N-NO_x 15 mg/l a 30 mg/l.

Při počáteční koncentraci N-NO_x 15 mg/l byl průběh denitrifikačního testu kontinuální a nedošlo k poklesu koncentrace N-NO_x pod kritickou hodnotu. Při opakovaných testech s počáteční koncentrací 15 mg/l byly průběhy testů i průměrná rychlost denitrifikace srovnatelné, jak je patrné z Obr. 2. Průměrná denitrifikační rychlost byla nejvyšší u testu J, v rozmezí 1,0–1,84 mg/l/d. U testu L a M byly zaznamenány nižší hodnoty a to zejména v posledním týdnu testu, u testu L 0,45–1,55 mg/l/d a u testu M 0,66–1,80 mg/l/d. Po 21 dnech byl roztok KNO₃ dávkován pouze u testu J, u zbývajících dvou byla koncentrace N-NO_x dostatečná.

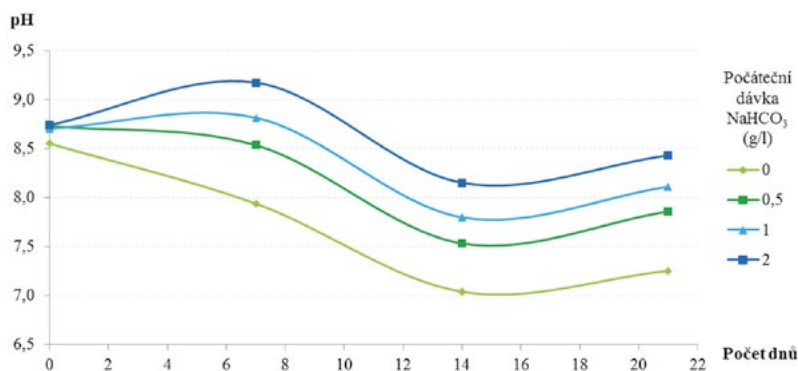
Odstraněný dusičnan může být přeměněn na dusitany, N₂O a NH₄⁺ [16]. Pan [17] a Li [18] tvrdí, že hodnota pH < 6,0 může způsobit nepříznivé účinky akumulace dusitanů nebo emise N₂O. Podobné výsledky byly pozorovány i při dlouhodobém testu, při nižších hodnotách pH byly naměřené hodnoty koncentrace N-NO₂ vyšší. Byly zaznamenány vyšší hodnoty N-NH₄ u testu J. Dle Zhao [1], dřevní štěpka obecně uvolňuje vysoké N-NH₄ během počáteční fáze, což vysvětluje zvýšené hodnoty u testu J. U dvou zbývajících testů byly hodnoty koncentrace N-NH₄ stabilní, nejvyšší hodnota 0,63 mg/l.

Hodnoty CHSK_{Cr} na konci testů se pohybovaly od 73 do 240 mg/l. Toto množství CHSK_{Cr} je dostatečné pro podporu denitrifikace [19]. Koncentrace kyslíku v průběhu testu J nepřekročily výrazně hodnotu 0,5 mg/l. U testů L a M byla zaznamenána vysoká hodnota koncentrace kyslíku v každé dílčí inkubační době. Pro snížení koncentrace kyslíku byly lahve probublány argonem, tak aby hodnota O₂ byla < 0,5 mg/l. Nejvyšší hodnoty P_C byly naměřeny u testu J 2,89–3,29 mg/l. U testu L byly hodnoty P_C 1,16 ± 0,40 mg/l a u testu M 1,17 ± 0,17 mg/l.

Obr. 2 Průběh denitrifikace s počáteční koncentrací N-NO_x 15 mg/l.

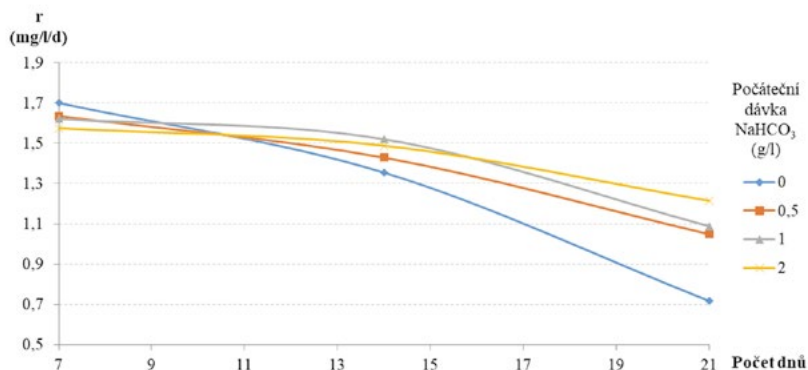
Dávka NaHCO₃, pH

Na Obr. 3 jsou znázorněny průběhy hodnot pH při různých dávkách NaHCO₃. U nejnižší dávky NaHCO₃ 0 g/l bylo pH v rozmezí od 7,04 až 8,55, naopak nejvyšší pH 8,15–9,17 u dávky 2 g/l. Dle Paule [20] je pH mezi 7,5 a 8,0 pro proces denitrifikace nejvhodnější. Optimum bylo u každé dávky překročeno na počátku testu, po vyluhování látek kyselého charakteru z hoblin po sedmi dnech kleslo pH pod hodnotu 8,0 pouze u dávky 0 g/l. Po 14 dnech se dostaly hodnoty do optimálního rozmezí u všech zkoušených dávek kromě dávky 2 g/l.

Obr. 3 Hodnoty pH v průběhu denitrifikace při různých dávkách NaHCO₃.

Obr. 4 znázorňuje průměrné denitrifikační rychlosti v průběhu testu s různými dávkami NaHCO₃. Po první dílčí inkubační době byla nejvyšší průměrná denitrifikační rychlost u dávky 0 g/l, na konci testu však dosáhla nejvyšší pokles. Dávky 0,5 g/l a 1 g/l byly porovnatelné v průběhu celého testu. Nejvyšší průměrné denitrifikační rychlosti za celé sledované období byly zaznamenány při nejvyšší dávce NaHCO₃ a to 2 g/l. Tyto výsledky jsou v rozporu s Cao [21], který v studii zaznamenal, že rychlost denitrifikace rostla s klesajícím pH v rozmezí 6,5–9,2.

Hodnoty kyslíku během testu stoupali nad 0,5 mg/l u všech zkoušených dávek, bylo nutné probublávání argonem. V průběhu testu byly hodnoty CHSK_{Cr} porovnatelné u všech dávek, v rozmezí od 79 do 170 mg/l, což je dostatečné pro podporu denitrifikace.



Obr. 4 Porovnání průměrné rychlosti v průběhu denitrifikace, při různých dávkách NaHCO₃.

4 ZÁVĚR

Při počáteční koncentraci N-NO_x 15 mg/l, dávce NaHCO₃ 0,5 g/l, a délce inkubační době sedmi dnů byly dosaženy optimální denitrifikační podmínky pro 28 denní test denitrifikace.

Metodika dlouhodobého testu je používána pro sledování chování vybraných pesticidních látek při denitrifikačních podmínkách.

Poděkování

Výzkum byl finančně podpořen v rámci Projektu specifického výzkumu FAST-J-20-6395, Degradace pesticidů v denitrifikačních bioreaktorech.

Použité zdroje

- [1] ZHAO, Jiamin, Qiaochong HE, Nan CHEN, Tong PENG a Chuanping FENG. Denitrification behavior in a woodchip-packed bioreactor with gradient filling for nitrate-contaminated water treatment. *Biochemical Engineering Journal* [online]. 2020, 154 [cit. 2020-10-19]. ISSN 1369703X. Dostupné z: doi:10.1016/j.bej.2019.107454
- [2] CANFIELD, Donald E., Alexander N. GLAZER a Paul G. FALKOWSKI. The Evolution and Future of Earth's Nitrogen Cycle. *Science* [online]. 2010, 330(6001), 192-196 [cit. 2020-10-19]. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science.1186120
- [3] ZHANG, Yan, Fadong LI, Qiuying ZHANG, Jing LI a Qiang LIU. Tracing nitrate pollution sources and transformation in surface- and ground-waters using environmental isotopes. *Science of The Total Environment* [online]. 2014, 490, 213-222 [cit. 2020-10-19]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2014.05.004
- [4] WEIGELHOFER, Gabriele a Thomas HEIN. Efficiency and detrimental side effects of denitrifying bioreactors for nitrate reduction in drainage water. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. 2015, 22(17), 13534-13545 [cit. 2020-08-26]. ISSN 0944-1344. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-015-4634-0
- [5] SCHIPPER, Louis A., Will D. ROBERTSON, Arthur J. GOLD, Dan B. JAYNES a Stewart C. CAMERON. Denitrifying bioreactors—An approach for reducing nitrate loads to receiving waters. *Ecological Engineering* [online]. 2010, 36(11), 1532-1543 [cit. 2019-11-10]. ISSN 09258574. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecoleng.2010.04.008
- [6] ŠEREŠ, Michal, Klára Anna MOCOVÁ, Jabbar MORADI, Michal KRIŠKA, Vladimír KOČÍ a Tereza HNÁTKOVÁ. The impact of woodchip-gravel mixture on the efficiency and toxicity of denitrification bioreactors. *Science of The Total Environment*. 2019, 647, 888-894. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.042
- [7] WARNEKE, Sören, Louis A. SCHIPPER, Michael G. MATIASEK, Kate M. SCOW, Stewart CAMERON, Denise A. BRUESEWITZ a Ian R. MCDONALD. Nitrate removal, communities of

- denitrifiers and adverse effects in different carbon substrates for use in denitrification beds. *Water Research* [online]. 2011, 45(17), 5463-5475 [cit. 2020-10-20]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2011.08.007
- [8] ADDY, Kelly, Arthur J. GOLD, Laura E. CHRISTIANSON, Mark B. DAVID, Louis A. SCHIPPER a Nicole A. RATIGAN. Denitrifying Bioreactors for Nitrate Removal: A Meta-Analysis. *Journal of Environmental Quality* [online]. 2016, 45(3), 873-881 [cit. 2020-10-20]. ISSN 00472425. Dostupné z: doi:10.2134/jeq2015.07.0399
- [9] SCHULZ, Ralf. Field Studies on Exposure, Effects, and Risk Mitigation of Aquatic Nonpoint-Source Insecticide Pollution: A Review. *Journal of Environmental Quality* [online]. 2004, 33(2), 419-448 [cit. 2020-09-23]. ISSN 00472425. Dostupné z: doi:10.2134/jeq2004.4190
- [10] DE SOUZA, Renata Mariane, Daiana SEIBERT, Heloise Beatriz QUESADA, Fátima DE JESUS BASSETTI, Márcia Regina FAGUNDES-KLEN a Rosângela BERGAMASCO. Occurrence, impacts and general aspects of pesticides in surface water: A review. *Process Safety and Environmental Protection* [online]. 2020, 135, 22-37 [cit. 2020-10-19]. ISSN 09575820. Dostupné z: doi:10.1016/j.psep.2019.12.035
- [11] MARGNI, M., D. ROSSIER, P. CRETTAZ a O. JOLLIET. Life cycle impact assessment of pesticides on human health and ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* [online]. 2002, 93(1-3), 379-392 [cit. 2020-08-26]. ISSN 01678809. Dostupné z: doi:10.1016/S0167-8809(01)00336-X
- [12] RICE, Pamela J., Patricia J. RICE, Ellen L. ARTHUR a Aldos C. BAREFOOT. Advances in Pesticide Environmental Fate and Exposure Assessments. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* [online]. 2007, 55(14), 5367-5376 [cit. 2020-08-26]. ISSN 0021-8561. Dostupné z: doi:10.1021/jf063764s
- [13] DOUGLASS, James F., Mark RADOSEVICH a Olli H. TUOVINEN. Biomining of atrazine and analysis of 16S rRNA and catabolic genes of atrazine degraders in a former pesticide mixing site and a machinery washing area. *Journal of Soils and Sediments* [online]. 2016, 16(9), 2263-2274 [cit. 2020-10-19]. ISSN 1439-0108. Dostupné z: doi:10.1007/s11368-016-1416-3
- [14] CHEN, Zhongbing, Yi CHEN, Jan VYMAZAL, Lumír KULE a Milan KOŽELUH. Dynamics of chloroacetanilide herbicides in various types of mesocosm wetlands. *Science of The Total Environment* [online]. 2017, 577, 386-394 [cit. 2020-10-19]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2016.10.216
- [15] PÁNIKOVÁ, Kristína. Vývoj testu inhibice denitrifikace. In: JUNIORSTAV 2020. Brno: ECON publishing, 2020, s. 515-521. ISBN 978-80-86433-73-8.
- [16] HU, Rongting, Xilai ZHENG, Tianyuan ZHENG, Jia XIN, Huan WANG a Qiguo SUN. Effects of carbon availability in a woody carbon source on its nitrate removal behavior in solid-phase denitrification. *Journal of Environmental Management* [online]. 2019, 246, 832-839 [cit. 2020-10-19]. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2019.06.057
- [17] PAN, Yuting, Liu YE, Bing-Jie NI a Zhiguo YUAN. Effect of pH on N₂O reduction and accumulation during denitrification by methanol utilizing denitrifiers. *Water Research* [online]. 2012, 46(15), 4832-4840 [cit. 2020-10-20]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2012.06.003
- [18] LI, Wei, Xiao-Yu SHAN, Zhi-Yao WANG, et al. Effect of self-alkalization on nitrite accumulation in a high-rate denitrification system: Performance, microflora and enzymatic activities. *Water Research* [online]. 2016, 88, 758-765 [cit. 2020-10-20]. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2015.11.003
- [19] LAHDHIRI, Ameni, Geoffroy LESAGE, Ahmed HANNACHI a Marc HERAN. Minimum COD needs for denitrification: from biological models to experimental set-up. *DESALINATION AND WATER TREATMENT* [online]. 2017, 61, 326-334 [cit. 2020-09-23]. Dostupné z: doi:10.5004/dwt.2017.11130
- [20] PAUL, Eldor Alvin. *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. 3rd Edit. Amsterdam: Elsevier, 2007. ISBN 978-0-12-546807-7.
- [21] CAO, Duantao, Ruilin WU, Suxia DONG, et al. Triazole resistance in *Aspergillus fumigatus* in crop plant soil after tebuconazole applications. *Environmental Pollution* [online]. 2020, 266 [cit. 2020-10-19]. ISSN 02697491. Dostupné z: doi:10.1016/j.envpol.2020.115124

STANOVENÍ ÚČINNOSTI AKTIVNÍHO UHLÍ PŘI ODSTRAŇOVÁNÍ LÉČIV Z VODY

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF ACTIVATED CARBON IN THE REMOVAL OF PHARMACEUTICALS FROM WATER

Daniela Lukášová¹, Renata Biela¹

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí, Žižkova 17, Brno, email: siblova.d@fce.vutbr.cz

Abstrakt

Hlavním tématem příspěvku je odstraňování léčiv z vody sorpcí na aktivním uhlí. Léčiva se do zdrojů pitné vody mohou dostat různými způsoby a následně pak ovlivnit nejen životní prostředí, ale i kvalitu vody. Protože v poslední době se výskyt farmaceutických přípravků ve vodě stal aktuálním tématem, byly pro odstraňování léčiv z vody již vyvinuty určité vodárenské procesy, mezi které patří např. adsorpce na aktivním uhlí. V rámci specifického výzkumu bylo na Ústavu vodního hospodářství obcí Fakulty stavební v Brně provedeno laboratorní měření, při kterém byla zjišťována účinnost dvou aktivních uhlí Filtrasorb F100 a F400. Odstraňovanou skupinou léčiv byla nesteroidní protizánětlivá léčiva. Z této skupiny byla vybrána čtyři léčiva, a to Diklofenak, Ibuprofen, Naproxen a Paracetamol. Výsledkem laboratorního odstraňování bylo porovnání dvou druhů aktivního uhlí z hlediska účinnosti odstraňování vybraných léčiv z vody.

Klíčová slova

Úprava pitné vody, adsorpce, mikropolutanty, léčiva, aktivní uhlí

Abstract

The removal of medicinal substances from water by sorption on activated carbon is the main topic of the paper. Pharmaceuticals can enter drinking water sources in efficient ways and subsequently affect not only the environment but also water quality. Recently, the emergence of pharmaceuticals in water has become a topical issue. For the removal of medicinal substances from water has already developed certain water treatment processes, including such as adsorption. As part of a specific research, a laboratory measurement was demonstrated at the Institute of Municipal Water Management of the Faculty of Civil Engineering in Brno, during which the efficiency of two activated carbons, Filtrasorb F100 and F400, was determined. Non-steroidal anti-inflammatory drugs were the selected group of pharmaceuticals for laboratory removed. Four pharmaceuticals were selected from this group, namely Diclofenac, Ibuprofen, Naproxen and Paracetamol. The result of the laboratory removal was a comparison of two types of activated carbon in terms of the efficiency of removing selected drugs from water.

Key words

Drinking water treatment, adsorption, micropollutants, pharmaceuticals, activated carbon

1 ÚVOD

Výskyt léčiv ve zdrojích pitné vody patří mezi aktuální témata v oblasti vodního hospodářství. Díky své přítomnosti ve vodě a bioakumulačním a degradačním vlastnostem mohou tyto polutanty ovlivňovat vodní biotu, ale také výkonnost a náklady na úpravu pitné vody. Kvalita zdrojů vody se zhoršuje v důsledku populačního růstu a tím se zpřísňují i předpisy zahrnující přísnější limity koncentrací. Zlepšování úpravárenských procesů souvisí s rostoucí energetickou i chemickou spotřebou, což vede k vyšším nákladům na úpravu pitné vody a dalším dopadům na životní prostředí. Vzhledem k hydrofilnímu charakteru farmaceutických sloučenin je obtížné je zcela odstranit během procesu na ČOV, proto sloučeniny přetrvávají a vyskytují se i v pitné vodě [1].

Důležitou otázkou v této oblasti je zahrnutí monitorování léčiv do legislativy. Prioritní polutanty jsou regulovány na mezinárodní úrovni kvůli jejich vysokému riziku pro vodní biotu a lidské zdraví, a to směrnici 2000/60/ES a rozhodnutím 2455/2001/ES. V roce 2012 byly do seznamu směrnice 2000/60/ES, která stanovuje limity vypouštění odpadních vod, navrženy farmaceutické látky, jako jsou Diklofenak a Estradiol. Následně byl

seznam 46 prioritních látek vydán jako příloha 6 do NV č. 401/2015, avšak bez léčiv a hormonů. Pro nové mikropolutanty, jako jsou léčiva a drogy, limitní hodnoty zatím žádná vyhláška neuvádí [1, 2].

2 MATERIÁLY A METODY

Experimentální odstraňování léčiv z vody bylo provedeno na Ústavu vodního hospodářství obcí na Fakultě stavební VUT v Brně. Metadou odstraňování byla adsorpce na dvou aktivních uhlích Filtrasorb F100 a F400. Vybranou skupinou léčiv byla nesteroidní protizánětlivá léčiva, konkrétně Diklofenak, Ibuprofen, Naproxen a Paracetamol. Technické parametry zvolených sorbentů a léčiv jsou uvedeny níže v podkapitolách.

Aktivní uhlí Filtrasorb

Granulované aktivní uhlí (GAU) Filtrasorb se používá k odstranění rozpuštěných organických sloučenin z vody. Granulovaný produkt je vyroben z vybraných asfaltových uhlí procesem známým jako reaglomerace. Aktivní uhlí je schopné odolat opotřebení, které je spojené s opakovaným proplachem, hydraulickou přepravou a reaktivací pro opětovné použití. Surové uhlí je těženo ve Spojených státech a následně vyráběno GAU tak, aby byla zajištěna nejvyšší kvalita a konzistence hotového výrobku. Aktivace je pečlivě kontrolována z důvodu vytvoření významného objemu jak nízkoenergetických, tak vysokoenergetických pórů pro účinnou adsorpci širokého spektra organických kontaminantů. Segregace uhlíkového lože je zachována i po opakovaném promývání a také zajišťuje, že adsorpční profil zůstane nezměněn, a proto se maximalizuje životnost lože ve filtru. Tento uhlíkatý materiál má vysokou hustotu, což má za následek větší adsorpční kapacitu na objem jednotky [3, 4].

Technické parametry aktivního uhlí Filtrasorb F100 a F400 jsou uvedeny níže v tabulce.

Tab. 1 Technické parametry sorbentů Filtrasorb F100 a F400.

Parametr	Jednotka	F100	F400
Specifický adsorpční povrch	m ² /g	850	1050
Methylenová modř	mg/g	230	300
Atrazin 1 µg/l	mg/g	40	40
Trichlorethylen 50 µg/l	mg/g	25	20
Sítový rozbor	%	< 0,6 mm	< 4
	%	> 2,36 mm	< 15
			< 0,425 mm
			> 1,7 mm
			< 4
			< 5
Střední velikost částic	mm	1	1,6
Objemová hmotnost	kg/m ³	500	450
Jodové číslo	mg/g	850	1000

Vybraná léčiva

Protože každé léčivo má jiné složení a účinek, jsou rozděleny do různých podskupin. Každá podskupina má své charakteristické vlastnosti, např. účinnou látku, způsob použití atd. Pro laboratorní odstraňování byla vybrána skupina nesteroidních protizánětlivých léčiv (NSAID – nonsteroidal anti-inflammatory drugs). Tato skupina léčiv zahrnuje léky na předpis, ale i bez předpisu, které mají analgetické, antipyretické a protizánětlivé účinky. Analgetické přípravky snižují vnímání bolesti, ale neodstraňují její příčinu. Antipyretika snižují zvýšenou teplotu. Mezi známé zástupce analgetik a antipyretik patří např. Ibuprofen, Diklofenak, Naproxen a Paracetamol [5, 6].

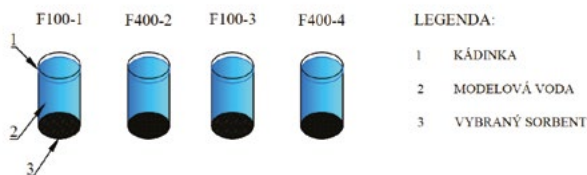
Protože výskyt léčiv ve vodách byl velmi diskutovaným tématem, byl v České republice proveden monitoring léčiv ve vodách. Ve vodě povrchové byly naměřeny maximální koncentrace jednotlivých léčiv v následujících hodnotách: Ibuprofen 4,4 µg/l, Diklofenak 0,272 µg/l, Naproxen 0,25 µg/l a Paracetamol 0,464 µg/l [7].

Modelová voda

Modelová voda byla vytvořena smícháním pitné vody a standardu vybraných léčiv v takovém poměru, aby se výsledná koncentrace léčiva ve vodě přiblížila reálné koncentraci v povrchových vodách. Standard čtyř vybraných léčiv byl připraven akreditovanou laboratoří ALS Czech Republic, s.r.o. Jako nádoba pro modelovou vodu byl použit 30l barel. Standard bylo zapotřebí ve vodě důkladně promíchat, aby byla koncentrace ve všech místech barelu stejná.

Statická zkouška

Statická zkouška probíhala paralelně ve dvou řadách pro všechny druhy sorbentů a léčiv z důvodu eliminace mylných výsledků. Odstraňování léčiv na sorbentech statickou zkouškou probíhalo 4 hodiny. Do předem připravených kádinek o objemu 1 litr byl nasypán sorpční materiál o celkové hmotnosti 10 gramů a následně byla kádinka naplněna 1 litrem modelové vody. Vzorky byly odebírány v časových intervalech po 1, 2 a 4 hodinách. Po každém odebrání vzorku byla modelová voda se sorbentem promíchána. V každém časovém úseku byla kromě koncentrace daného léčiva také měřena teplota vody a pH v každé kádince. Z důvodu složitosti analýzy byly odebrané vzorky předány na vyhodnocení akreditované laboratoři ALS Czech Republic s.r.o. Protože analýza stanovení Ibuprofenu ve vodě je odlišná od analýz, kterými se stanovuje Diklofenak, Naproxen a Paracetamol, byly vzorky odebírány do dvou různých vzorkovnic.



Obr. 1 Schéma statické zkoušky.

Vyhodnocení účinnosti odstranění

Pro stanovení účinnosti sorbentů při odstraňování léčiva z vody byl použitý vzorec (1) na přepočítání účinnosti podle koncentrace:

$$\mu = \frac{(c_0 - c_m) \cdot 100}{c_0} \quad (1)$$

kde

μ	účinnost odstranění léčiva z vody [%]
c_0	koncentrace léčiva v surové vodě [mg·l ⁻¹]
c_m	koncentrace léčiva v čase t [mg·l ⁻¹]

3 VÝSLEDKY A DISKUSE

Výsledné účinnosti aktivního uhlí

Naměřené koncentrace léčiv stanovené akreditovanou laboratoří byly přepočteny podle vzorce (1) na účinnosti jednotlivých sorbentů při odstraňování léčiv z vody. Podle vypočtených hodnot je zřejmé, že aktivní uhlí Filtrasorb ve většině případů spolehlivě odstranilo koncentrace jednotlivých léčiv z vody. Vzhledem k tomu, že statická zkouška probíhala paralelně ve dvou řadách kádinek, vznikly při vyhodnocení drobné odchylky ve vypočtených účinnostech odstranění léčiva. Celkově se účinnost odstranění u adsorbentu Filtrasorb F100 pohybovala od 66,27 % do 99,59 %. Pro adsorbent Filtrasorb F400, který má větší adsorpční povrch, se účinnost odstranění pohybovala v rozmezí od 71,64 % do 99,17 %. V následujících tabulkách jsou uvedeny vypočtené účinnosti aktivního uhlí pro jednotlivá léčiva.

Tab. 2 Vypočtené účinnosti adsorbentů při odstranění Diklofenaku.

Čas [hod]	Diklofenak [µg/l]			
	F100 1	F400 2	F100 3	F400 4
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	96,21	92,90	95,58	95,46
2	93,52	96,24	91,43	96,51
4	93,82	96,00	96,09	96,75

Pro odstranění Diklofenaku z vody se jako účinnější ukázalo aktivní uhlí Filtrasorb F400, které dosahovalo účinnosti až nad 96 %. Již při prvním odběru vzorků byla účinnost odstranění ve všech kádinkách nad 90 %.

Tab. 3 Vypočtené účinnosti adsorbentů při odstranění Ibuprofenu.

Čas [hod]	Ibuprofen [µg/l]			
	F100 1	F400 2	F100 3	F400 4
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	86,53	99,14	89,30	99,17
2	98,19	98,62	66,27	98,93
4	98,57	98,28	99,59	98,80

Obě aktivní uhlí Filtrasorb se při odstraňování Ibuprofenu ukázala jako velice účinná. Filtrasorb F100 sice po první hodině léčivo odstranil pouze pod 90 %, ale po čtyřech hodinách dosahovala účinnost odstranění až 99,59 %. Zatímco aktivní uhlí Filtrasorb F400 již po prvním odběru vzorků odstranil Ibuprofen na 99 %.

Tab. 4 Vypočtené účinnosti adsorbentů při odstranění Naproxenu.

Čas [hod]	Naproxen [µg/l]			
	F100 1	F400 2	F100 3	F400 4
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	96,83	93,69	96,09	96,69
2	95,17	96,62	92,00	96,78
4	93,36	96,78	96,34	96,97

Odstraňování Naproxenu probíhalo u obou aktivních uhlí výborně. Rozmezí účinnosti se pohybovalo od 93,69 % do 96,97 %. Pouze v první kádince se sorbentem Filtrasorb F100 se po druhé a čtvrté hodině odběru snížila účinnost. Aktivní uhlí Filtrasorb F400 prokázalo po 4 hodinách vyšší účinnost odstranění Naproxenu než Filtrasorb F100.

Tab. 5 Vypočtené účinnosti adsorbentů při odstranění Paracetamolu.

Čas [hod]	Paracetamol [µg/l]			
	F100 1	F400 2	F100 3	F400 4
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	92,90	77,52	87,14	83,17
2	93,76	73,74	87,44	81,16
4	82,69	71,64	96,45	75,21

Vypočtené hodnoty účinnosti odstranění Paracetamolu nebyly tak příznivé jako u Diklofenaku, Ibuprofenu a Naproxenu. V kádinkách s aktivním uhlím Filtrasorb F100 byly účinnosti odstranění rozdílné. V kádince č. 1 se účinnost odstranění nakonec snížila oproti účinnosti po první hodině na hodnotu 82,69 %. V kádince č. 3 byla účinnost naopak vzrůstající až k hodnotě 96,45 %. Druhý sorbent Filtrasorb F400 se v tomto měření neukázal tak vhodný jako sorbent Filtrasorb F100, protože jeho konečná účinnost odstranění nedosáhla ani 76 %. Snižování účinnosti odstranění neboli zvyšování koncentrace v průběhu statické zkoušky spíše naznačuje proces desorpce než adsorpce. Vzhledem k tomu, že statická zkouška byla provedena paralelně a v obou případech je naznačující proces desorpce prokazatelný, dle provedeného laboratorního experimentu adsorbent Filtrasorb F400 nebyl tak účinný jako u ostatních léčiv i přesto, že má větší adsorbční povrch než Filtrasorb F100.

Hodnoty teploty a pH

Kromě koncentrace léčiv mezi další měřené parametry při laboratorním odstraňování byly zařazeny také pH a teplota. Důležitým ukazatelem kvality vody je hodnota pH, která je definována jako záporný logaritmus vodíkových iontů. Ovlivňuje účinnost chemických, fyzikálně chemických a biologických procesů používaných při úpravě vody. Z hlediska vnímání chuti je ideální pH v neutrální oblasti, tj. od 6,5 do 7,5. Vyhláška 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody, uvádí limitní hodnotu pro pH v intervalu od 6,5 do 9,5. Reakce vody je bezrozměrný ukazatel, který je ovlivněn i teplotou vody. Při teplotách vod vyšších jak 25 °C je hodnota pH menší než 7 a při teplotách nižších jak 25 °C naopak vyšší. Teplota patří také k významným ukazatelům pitné vody. Významně ovlivňuje chemickou a biochemickou reaktivitu i v poměrně úzkém teplotním rozmezí, a to od 0 °C asi do 30 °C [8,9].

Počáteční hodnota pH byla 7,03 a následně se v každé kádince vlivem sorpčního materiálu zvyšovala. Hodnoty pH se během statické zkoušky pohybovaly od 7,03 do 7,69. Toto rozmezí hodnot plně vyhovuje vyhlášce pro kvalitu pitné vody.

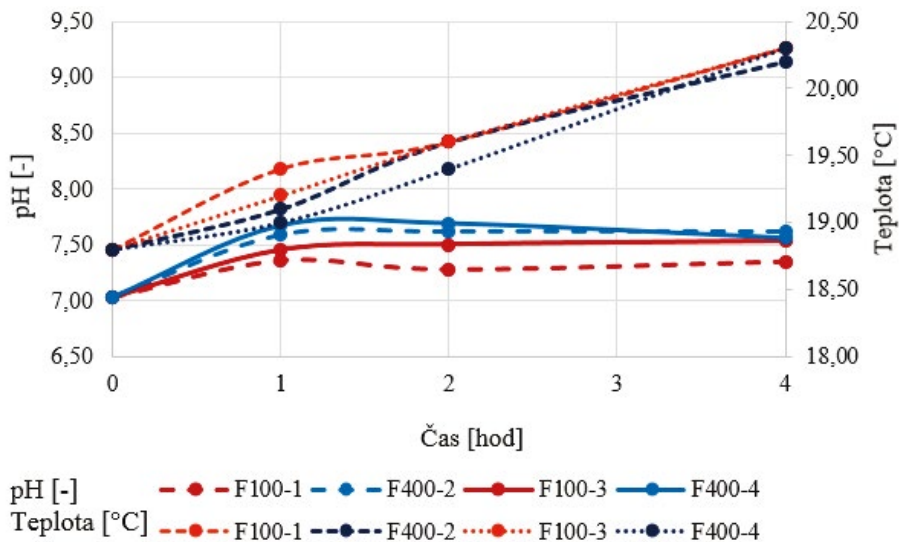
Teplota modelové vody byla nižší než naměřená teplota během statické zkoušky. Počáteční teplota byla naměřena na hodnotu 18,8 °C. Teplota modelové vody byla nejspíše ovlivněna vnitřní teplotou v laboratoři.

Níže v tabulce jsou uvedeny jednotlivé hodnoty pH a teploty vody naměřené během statické zkoušky.

Tab. 6 Naměřené hodnoty pH a teploty během statické zkoušky.

Čas [hod]	pH [-]				teplota [°C]			
	F100 1	F400 2	F100 3	F400 4	F100 1	F400 2	F100 3	F400 4
0	7,03	7,03	7,03	7,03	18,80	18,80	18,80	18,80
1	7,36	7,59	7,45	7,67	19,40	19,10	19,20	19,00
2	7,28	7,62	7,50	7,69	19,60	19,60	19,60	19,40
4	7,35	7,62	7,53	7,56	20,30	20,20	20,30	20,30

Z níže uvedeného grafu vyplývá, že pH vody je závislé a době kontaktu vody se sorpčním materiálem. Vlivem obou sorbentů se pH vody v čase zvyšuje. Co se týká teploty modelové vody, tak vzrůstá s časem, což je zřejmě způsobeno teplotou v laboratoři.



Obr. 2 Závislost pH a teploty vody na čase.

4 ZÁVĚR

Výzkum v oblasti výskytu léčiv ve zdrojích pitné vody je stále aktuálním tématem, proto testování sorpčních materiálů je žádoucí. Aktivní uhlí se v praxi běžně používá pro odstranění širokého spektra polutantů, ale pro odstraňování farmak ze zdrojů pitné vody se používá až posledních pár let a dosahuje tak dobrých výsledků i pro tuto skupinu mikropolutantů.

Během statické zkoušky byly měřeny také hodnoty pH a teploty. Při tomto laboratorním experimentu proběhla závislost, kdy při zvyšující se teplotě modelové vody se zvyšovaly hodnoty pH. Tato závislost potvrzuje informaci ze zdroje [8], kdy při teplotách nižších jak 25 °C by hodnota pH měla být vyšší jak 7. Pro odstraňování léčiv z vody tedy byly splněny vhodné podmínky modelové vody.

Pro stanovení účinnosti aktivního uhlí při odstraňování léčiv z vody, které bylo cílem a je popsáno v tomto článku, se aktivní uhlí Filtrasorb potvrdila jako účinná. Protože každé léčivo i sorbent má jiné vlastnosti, odstraňuje každý sorbent různé léčivo rozdílně. Proto byla statická zkouška provedena paralelně, aby bylo eliminováno co nejvíce mylných výsledků. Z naměřených koncentrací a vypočtených hodnot účinnosti se jako vhodnější ukázalo aktivní uhlí Filtrasorb F400, které mělo spodní hranici účinnosti vyšší než Filtrasorb F100. Na každé léčivo působil každý sorbent jinak, proto účinnosti při odstraňování Paracetamolu nedosahovaly tak vysokých hodnot jako v ostatních případech. V některých případech docházelo spíše k desorpci, což je opak adsorpce. Jedná se vlastně o uvolňování adsorbované látky zpět do prostředí, kterým je v tomto případě voda. Látka může být uvolňována buď z povrchu, nebo z objemu adsorbentu. Pro desorpci je zvláště důležité pH, protože určuje například adsorpční sílu slabých kyselin a bází na aktivních uhlících. [10] Obě aktivní uhlí Filtrasorb F100 i Filtrasorb F400 hodnotíme na základě provedeného laboratorního experimentu jako vhodná pro odstraňování nesteroidních protizánětlivých léčiv z vody.

Poděkování

Príspevek byl zpracován v rámci řešení grantového projektu specifického vysokoškolského výzkumu na VUT v Brně s názvem „Aktuální problémy vodního hospodářství obcí“ (FAST-J-20-6431).

Použité zdroje

- [1] TEODOSIU, C., at all. Emerging pollutants removal through advanced drinking water treatment: A review on processes and environmental performances assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2018, s. 1210-1221.
- [2] WANNER, J. Problematika mikropolutantů ve vodním prostředí: Možné přístupy a zkušenosti z ČOV v zahraničí. Seminář CzWA. Praha, 2016. Problematika mikropolutantů při čištění odpadních vod a při úpravě vody na pitnou.
- [3] FILTRASORB®100: Granulated Activated Carbon. Calgon Carbon Corporation, DS-FILTRA10015-EIN-E1, 2015. Propagační materiál výrobce.
- [4] FILTRASORB®400. Granulated Activated Carbon. Calgon Carbon Corporation, DS-FILTRA40019-EIN-E1, 2019. Propagační materiál výrobce.
- [5] PRASAD, M.N.V. Pharmaceuticals and personal care products waste management and treatment technology: emerging contaminants and micro pollutants. Waltham : Elsevier, 2019. ISBN: 978-0-12-816189-0.
- [6] LÜLLMAN, H., MOHR, K., WEHLING, M. Farmakologie a toxikologie, 2. vydání, Praha, Grada Publishing, 2004, ISBN: 80-247-0836-1.
- [7] KOŽÍŠEK F., ČADEK V. Léčiva v pitných vodách. Sborník konference Pitná voda 2008, s. 77-88. W&ET Team, Č. Budějovice, 2008. ISBN 978-80-254-2034-8.
- [8] PITTER, Pavel. Hydrochemie. 5. aktualizované a doplněné vydání. Praha: Vysoká škola chemickotechnologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-928-0.
- [9] Vyhláška č. 70/2018 Sb., kterou se mění vyhláška č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody, ve znění pozdějších předpisů. Ministerstvo zdravotnictví České republiky. 2014
- [10] WORCH, E. Adsorption technology in water treatment: fundamentals, processes, and modeling. Boston: De Gruyter, 2012. ISBN 978-3-11-024022-1.

EXPERIMENTÁLNÍ ODSTRANĚNÍ KOVŮ Z VODY ZA POUŽITÍ SORPČNÍCH MATERIÁLŮ

EXPERIMENTAL REMOVAL OF METALS FROM WATER USING SORPTION MATERIALS

Světlana Moravčíková*,¹, Renata Biela¹

*moravcikova.s@fce.vutbr.cz

¹Ústav vodního hospodářství obcí, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Žižkova 17, 602 00

Abstrakt

V současnosti se ve zdrojích pitné vody objevuje celá řada znečišťujících látek, mezi které patří také kovy a jejich sloučeniny. Cílem experimentu je posouzení odstranění kovů z pitné vody sorpčními materiály GEH a Bayoxide E33. Byla provedena statická laboratorní zkouška, při níž byly do kádínek odváženy sorpční materiály a poté byla přidána voda obsahující arsen, nikl a olovo. V časech 1, 2 a 4 hodiny od začátku zkoušky byly odebírány vzorky vody, ve kterých byly následně stanoveny koncentrace kovů. K největšímu snížení koncentrací ve vodě došlo u arsenu na materiálu GEH, sorbovala se na něj většina tohoto polokovu. U niklu a olova došlo v případě obou materiálů k podstatně menšímu snížení koncentrací.

Klíčová slova

Sorpční materiály, toxické kovy, polutanty, voda

Abstract

At present, a number of pollutants appear in drinking water sources, including metals and their compounds. The aim of this experiment is to assess the removal of metals from drinking water by sorption materials GEH and Bayoxide E33. A static laboratory test was performed in which sorption materials were weighed into beakers and then water containing arsenic, nickel and lead was added. Water samples were taken at 1, 2 and 4 hours from the start of the test. Metal concentrations were subsequently determined in these samples. The largest decrease in concentrations in water occurred with arsenic on the GEH material, most of this semi-metal was sorbed. In the case of nickel and lead, there was a significantly smaller decrease in concentrations on both materials.

Key words

Sorption materials, toxic metals, pollutants, water

1 ÚVOD

V současnosti se ve zdrojích pitné vody objevuje celá řada znečišťujících látek. Patří mezi ně také kovy a jejich sloučeniny, které škodí nejen člověku, ale také ostatním živočichům a rostlinám. Dále tak může být negativně ovlivněno i zemědělství či průmyslové závody, které mají mnohdy přísnější požadavky na jakost vody.

Zvyšující se úroveň urbanizace a s ní související potřeba vody v oblastech průmyslové činnosti výrazně přispívají k problému výskytu kovů v podzemních zdrojích vody. V malých množstvích jsou určité kovy esenciální pro zdraví člověka, avšak ve velkých množstvích mohou způsobovat akutní či chronickou toxicitu [1].

Vápník, hořčík, draslík a sodík by měly být v těle přítomny v určitém množství, aby udržely např. acidobazickou rovnováhu. Kovy jako jsou železo, mangan, měď, kobalt, molybden či zinek je zapotřebí udržovat v těle v nízkých koncentracích. V případě nedostatku, případně naopak vysokých koncentrací těchto kovů, může docházet ke zdravotním komplikacím. Pitím vody s obsahem toxických kovů jako je arsen, kadmium, chrom, olovo, rtuť a nikl mohou nastat velmi závažné zdravotní komplikace, mnohdy končící smrtí [1].

Většina těžkých kovů se dostává do ovzduší a atmosféry z průmyslové činnosti, přičemž dochází k průsaku do podzemních vod, které jsou následně užívány jako zdroje pitné vody. Toxické kovy jsou prvky představující nejvyšší formu perzistentních polutantů znečišťujících životní prostředí, přičemž jsou chemicky a biologicky nezníčitelné [1].

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Kovy

Téměř všechny kovy jsou ve vodách obsaženy alespoň ve stopových množstvích, v závislosti na geologických podmínkách. K obohacení vody dochází stykem s horninami a půdou. Týká se to především makrokomponent (Ca, Mg, Na, K), v okolí rudných nalezišť však může dojít také k obohacení vody vysokým množstvím toxických kovů. V současnosti je značně obtížné odlišit ve vodách přírodní pozadí od antropogenního znečištění [2].

V pitné vodě je limitováno 18 kovů a polokovů, jejichž obsah patří i mezi ukazatele přípustného obsahu látek v povrchových vodách. Negativní vliv vyšších koncentrací některých kovů nespočívá v jejich toxicitě, ale především v ovlivnění organoleptických a technických vlastností vody [2].

Součástí komplexního hodnocení jakosti povrchových vod a chemického stavu útvarů povrchových vod jsou informace o kvalitě pevných složek vodního ekosystému, jako jsou plaveniny a říční sedimenty. Analýzy některých znečišťujících látek v plaveninách a sedimentech poskytují v porovnání s analýzou vody věrohodnější informace o přítomnosti látky v tocích. V roce 2017 bylo z těžkých kovů při zohlednění geogenního pozadí vyhodnoceno v nadlimitních koncentracích s lokálním výskytem olovo, kadmium, rtuť a ojedinele nikl [3].

Jako nejvýraznější ukazatele znečištění podzemních vod v roce 2017 se jeví tyto kovy: baryum, mangan, arsen, kobalt a nikl [3].

Adsorpce

Adsorpce je proces fázového přenosu, který je v praxi hojně využíván k odstranění látek z tekutých fází (plynů nebo kapalin). Lze jej také pozorovat jako přirozený proces v různých složkách životního prostředí. Při úpravě vody se adsorpce prokázala jako účinný proces při odstraňování mnoha rozpuštěných látek. Molekuly nebo ionty jsou odstraněny z vodného roztoku adsorpcí na pevné povrchy. Látka, která se adsorbuje, se nazývá adsorbát a materiál, na kterém adsorpce probíhá, se nazývá adsorbent [4].

Ve vodárenství je adsorpce běžně používanou metodou pro úpravu pitné vody. Slouží k eliminaci nežádoucích látek, které způsobují změnu sensorických vlastností vody a vedlejších látek vznikajících při dezinfekci vody. Při adsorpčních procesech mohou být použity různé sorpční materiály, které se dělí do několika skupin podle účelu odstraňování látek z vody. V současnosti jsou nejpoužívanější granulované filtrační materiály na bázi oxidu a hydroxidu železa, mezi které patří také materiály GEH a Bayoxide E33 [5].

Použití sorpční materiály

Sorpční materiál GEH je založený na bázi granulovaného hydroxidu železa. Je vhodný k hospodárnému a efektivnímu odstranění arsenu a antimonu z vody. Adsorpční kapacita materiálu závisí na provozních podmínkách [6].

Bayoxide E33 je suchý krystalický granulovaný sorbent na bázi oxidů železa. Vyvinula jej společnost Severn Trent ve spolupráci se společností Bayer AG. Materiál byl navržen k odstraňování arsenu, jeho výhodou je, že společně s oběma formami arsenu (As^{III} a As^V) odstraňuje také železo a mangan [7].

Tab. 1 Přehled vlastností sorpčních materiálů [6].

Parametr/Jednotka	Bayoxide E33	GEH
Velikost částic/mm	0,5–2,0	0,2–2,0
Objemová hmotnost/g.cm ⁻³	0,4–0,6	1,25
Specifický povrch/m ² .g ⁻¹	120–200	250–300
Barva	jantarová	tmavě hnědá až černá

3 METODIKA

Experiment probíhal statickou zkouškou v laboratoři Ústavu vodního hospodářství obcí, Fakulty stavební VUT v Brně po dobu 4 hodin. Do každé z připravených kádinek bylo nasypáno 10 g sorpčního materiálu a následně byl nalit 1 l předem nachystané modelové vody s obsahem kovů - arsenu, niklu a olova. V časových intervalech 1, 2 a 4 hodiny byla voda v kádinkách promíchána a byly odebrány vzorky k rozborům. Ve vzorcích bylo měřeno pH, teplota a zákal a následně byly poslány k rozborům pro zjištění koncentrací jednotlivých kovů.

4 VÝSLEDKY

V Tab. 1 a Tab. 2 jsou zaznamenány naměřené veličiny v jednotlivých vzorcích a stanovené hodnoty koncentrací jednotlivých kovů.

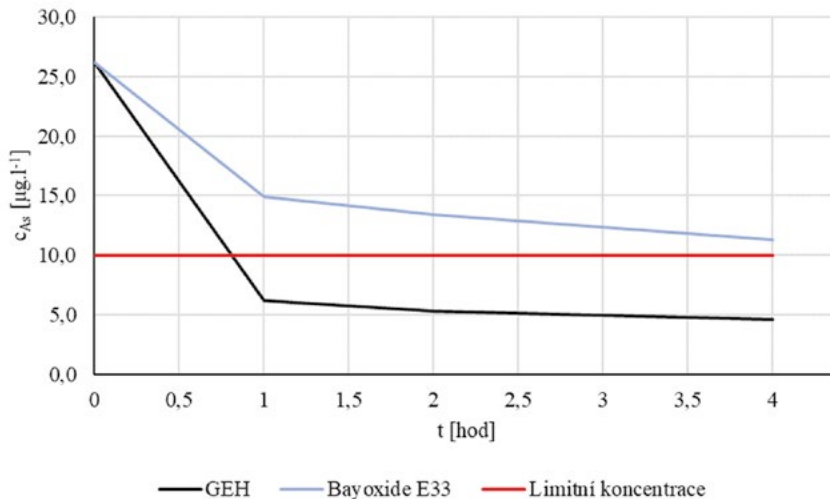
Tab. 2 Výsledky adsorpce na materiálu GEH.

GEH					
čas [hod]	pH [-]	teplota [°C]	cAs [µg/l]	cNi [µg/l]	cPb [µg/l]
0	6,88	18,7	26,2	35,3	26,6
1	7,26	19,0	6,2	33,4	23,5
2	6,92	19,6	5,3	32,8	18,7
4	7,18	20,3	4,6	31,4	15,3

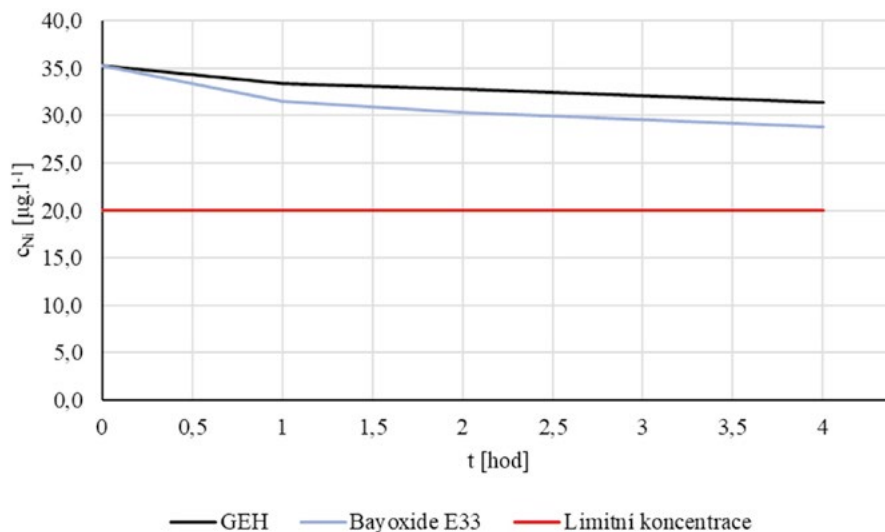
Tab. 3 Výsledky adsorpce na materiálu Bayoxide E33.

Bayoxide E33					
čas [hod]	pH [-]	teplota [°C]	cAs [µg/l]	cNi [µg/l]	cPb [µg/l]
0	6,88	18,7	26,2	35,3	26,6
1	7,26	18,9	14,9	31,5	24,3
2	6,95	19,5	13,4	30,3	23,2
4	7,13	20,1	11,3	28,8	19,8

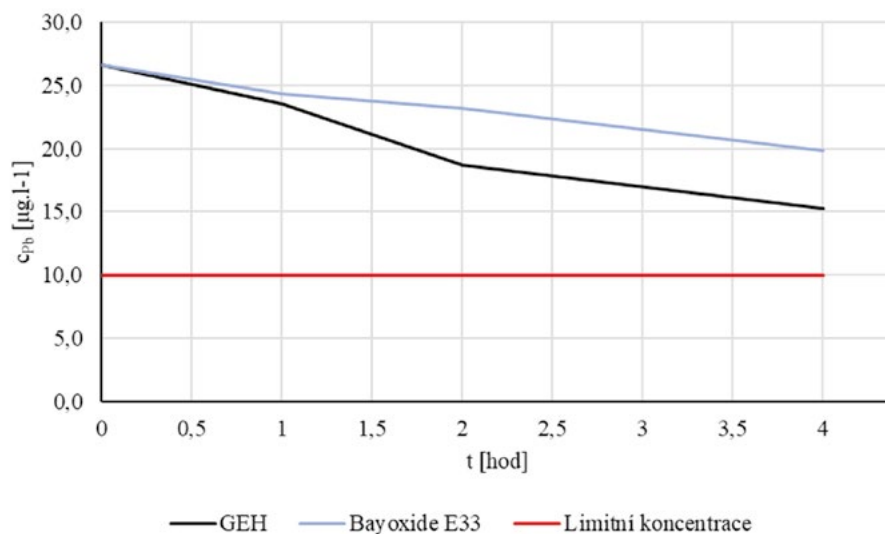
Hodnoty koncentrací kovů byly dále zpracovány do grafů (Obr. 1, Obr. 2 a Obr. 3), sloužících k přehlednému porovnání výsledků materiálů GEH a Bayoxide E33 a také k posouzení, zda vzorky splňují limity kovů dané pro pitnou vodu. V tabulce jsou zaznačeny limitní koncentrace kovů dané Vyhláškou 252/2004 Sb., které jsou následující: pro arsen a olovo 10 µg/l a pro nikl 20 µg/l [8].



Obr. 1 Výsledný graf průběhu koncentrace arsenu.



Obr. 2 Výsledný graf průběhu koncentrace niklu.



Obr. 3 Výsledný graf průběhu koncentrace olova.

5 DISKUZE

Zaměříme-li se na koncentrace jednotlivých kovů, nejvyšší a zároveň nejrychlejší pokles koncentrace ve vodě je na první pohled zřejmý u arsenu, a to v případě obou materiálů. U materiálu GEH byl však tento pokles významnější, koncentrace arsenu klesla již po 1 hodině z 26,2 µg/l na 6,2 µg/l, což je pod limitní hodnotou tohoto prvku v pitné vodě. Tato koncentrace se dále snižovala, po 4 hodinách klesla na 4,6 µg/l. Materiál Bayoxide E33 snížil po 1 hodině koncentraci arsenu na 14,9 µg/l, po 4 hodinách se pak koncentrace arsenu s hodnotou 11,3 µg/l přiblížila limitu pro pitnou vodu.

Když se podíváme na koncentrace niklu, vidíme, že ani jeden z materiálů neodstranil kov do takové míry, aby splňoval limit pro pitnou vodu. Z grafu (Obr. 2) je patrné, že při odstraňování niklu byl účinnější materiál Bayoxide E33. Ten snížil koncentraci niklu po 4 hodinách z 35,3 µg/l na 28,8 µg/l, zatímco materiál GEH na 31,4 µg/l. V obou případech probíhalo odstraňování kovu převážně rovnoměrně.

Posledním odstraňovaným kovem bylo olovo, ani u něj nezvládly materiály snížit koncentraci pod limitní hodnotu. Při odstraňování tohoto kovu byl však účinnější materiál GEH, po 4 hodinách snížil koncentraci olova z 26,6 µg/l na 15,3 µg/l. Materiál Bayoxide E33 snížil po 4 hodinách koncentraci olova na 19,8 µg/l.

V průběhu celé statické zkoušky docházelo k postupnému snižování koncentrace všech kovů, je tak možné, že kdyby zkouška trvala déle, koncentrace kovů by ještě klesly, avšak je nepravděpodobné, že by tento pokles byl významný. Ani jeden z sorpčních materiálů GEH a Bayoxide E33 nesnížil koncentrace všech kovů pod limity pro pitnou vodu, dá se však předpokládat, že při dynamické zkoušce by tyto sorpční materiály dosáhly výrazně vyšší účinnosti a odstranily kovy pod limitní hodnoty.

Když se podíváme na ostatní sledované veličiny, vidíme, že pH se v případě obou materiálů pohybuje po celou dobu experimentu v hodnotách blízkých neutrálnímu pH - 7, vyskytují se zde pouze drobné výkyvy. Teplota vody má opět u obou materiálů obdobné tendence, pozvolna se zvyšuje, což je dáno s největší pravděpodobností teplotou vzduchu v laboratoři.

6 ZÁVĚR

V důsledku pití vody s obsahem toxických kovů jako je arsen, kadmium, chrom, olovo, rtuť a nikl může docházet k závažným zdravotním komplikacím, v některých případech končících až smrtí. Proto je důležité, aby byly tyto kovy z pitné vody odstraňovány. V rámci provedeného experimentu byla vyzkoušena schopnost vybraných sorpčních materiálů odstranit některé z těchto kovů, konkrétně byly odstraňovány arsen, nikl a olovo.

Při statické zkoušce provedené v laboratoři Ústavu vodního hospodářství obcí Fakulty stavební VUT v Brně dosáhl lepších výsledků při odstraňování kovů materiál GEH. Ten v případě arsenu dokonce snížil koncentraci tohoto prvku již po jedné hodině pod hodnotu limitní koncentrace pro pitnou vodu. Při odstraňování niklu pak byl sice o trochu účinnější materiál Bayoxide E33, avšak koncentraci olova snížil v porovnání s Bayoxidem E33 na nižší hodnotu opět materiál GEH. Materiál Bayoxide E33 docílil také výrazného snížení koncentrace arsenu, již po jedné hodině klesla koncentrace téměř na polovinu a dále klesala, avšak ani po čtyřech hodinách neklesla pod limit pro pitnou vodu. Při odstraňování niklu a olova však ani jeden ze sorpčních materiálů nedosáhl snížení koncentrace těchto kovů pod limity pro pitnou vodu.

I když ani jeden ze sorpčních materiálů GEH a Bayoxide E33 nesnížil koncentrace všech kovů pod limity pro pitnou vodu, došlo při statické zkoušce k jejich postupnému snižování. Dá se tak předpokládat, že v případě provedení dynamické zkoušky by tyto sorpční materiály dosáhly výrazně vyšší účinnosti a odstranily kovy pod limitní hodnoty.

Poděkování

Príspevek byl zpracován v rámci řešení grantového projektu specifického vysokoškolského výzkumu na VUT v Brně s názvem "Aktuální problémy vodního hospodářství obcí" (FAST-J-20-6431).

Použité zdroje

- [1] FERRANTE, Margherita, Gea OLIVERI CONTI, Zorica RASIC-MILUTINOVIC a Dragana JOVANOVIĆ. Health effects of metals and related substances in drinking water. London: IWA Publishing, 2014. Metals and related substances in drinking water series. ISBN 978-1-78040-598-8.
- [2] PITTER, Pavel. Hydrochemie. 5. vydání. Praha: VŠCHT Praha, 2015. ISBN 978-80-7080-928-0.
- [3] WORCH, Eckhard. Adsorption Technology in Water Treatment: Fundamentals, Processes, and Modeling. Drážďany: de Gruyter, 2012. ISBN 978-3-11-024023-8.
- [4] Zpráva o stavu vodního hospodářství České republiky v roce 2017 [online]. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2018 [cit. 2020-06-12]. ISBN 978-80-7434-463-3. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/607186/Modra_zprava_2017_WEB_18.pdf
- [5] MARKO, Ivana, Danka BARLOKOVÁ a Ján ILAVSKÝ. Použití vybraných sorpčních materiálů při odstraňování bromičnanů z vody. TZB-info [online]. 21. 5. 2018 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/vlastnosti-a-zdroje-vody/17389-pouzitie-vybranych-sorpenych-materialov-pri-odstranovani-bromicnanov-z-vody>
- [6] BIELA, Renata and Lucie ŠOPIKOVÁ. Efficiency of sorption materials on the removal of lead from water. Applied Ecology and Environmental Research [online]. 2017, 15(3), 10 [cit. 2020-11-25].

ISSN 1785 0037. Dostupné z: http://aloki.hu/indvol15_3.htm

- [7] ILAVSKÝ, Ján a Danka BARLOKOVÁ. Odstraňovanie niklu z vody sorpčnými materiálmi. TZB-info [online]. 23. 5. 2011 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/vlastnosti-a-zdroje-vody/7482-odstranovanie-niklu-z-vody-sorpcnymi-materialmi>
- [8] Vyhláška č. 252/2004 Sb., vyhláška, kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody.

NÁVRH METODIKY PRO MĚŘENÍ TEPLOTY PITNÉ VODY PŘES STĚNU POTRUBÍ

DESIGN OF METHODOLOGY FOR MEASUREMENT OF DRINKING WATER TEMPERATURE THROUGH THE PIPE WALL

Jana Nováková^{*1}, Jan Ručka¹

^{*}novakova.j@fce.vutbr.cz

¹NázevVysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí, Žižkova 95/17, 602 00 Brno

Abstrakt

Tento článek je zaměřen na problematiku měření teploty vody ve vodárenských distribučních sítích. Zvýšená teplota vody může mít za určitých podmínek negativní vliv na jakost pitné vody, což může v krajních případech vést až ke ztrátě statusu hygienické nezávadnosti pitné vody. Článek obsahuje přehled negativních důsledků zvýšené teploty vody na její jakost, přehledně představení všech částí distribučního systému, ve kterých může dojít ke změně teploty vody a popisuje stávající postupy pro měření teploty vody. Součástí práce je také popis navrhané metodiky pro kontinuální měření teploty vody v distribuční síti, jejíž proveditelnost byla experimentálně zkoušena v laboratorních podmínkách.

Klíčová slova

Teplota vody, pitná voda, zásobování pitnou vodou, jakost vody, měření

Abstract

This article focuses on the issue of measuring the temperature of water in water distribution networks. Under certain conditions, the increased water temperature can have a negative effect on the quality of drinking water, which in extreme cases can lead to the loss of the status of hygienic safety of drinking water. The article contains an overview of the negative consequences of increased water temperature on its quality, a clear presentation of all parts of the distribution system in which the water temperature can change and describes the existing procedures for measuring the water temperature. Part of the work is also a description of the proposed methodology for continuous measurement of water temperature in the distribution network, the feasibility of which was experimentally tested in laboratory conditions.

Key words

Water temperature, drinking water, drinking water distribution, water quality, measurement

1 ÚVOD

Teplota vody je fyzikální ukazatel jakosti vody, který je součástí každého rozboru jakosti pitné vody, jejichž četnost a rozsah stanovuje vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 252/2004 Sb., v aktuálním znění. Tato vyhláška stanovuje doporučený interval hodnot teploty vody v distribuční síti na 8–12 °C. Status doporučeného intervalu (resp. hodnoty) udává možnost, aby byl tento interval (limitní hodnota) překročen nebo nedosažen, aniž by došlo ke ztrátě hygienické nezávadnosti pitné vody [1].

Z výročních zpráv *Systému monitorování zdravotního obyvatelstva ČR ve vztahu k životnímu prostředí – Subsytém II: Zdravotní důsledky a rizika znečištění pitné vody* je patrné, že k překročení doporučených hodnot teploty vody dochází pravidelně každý rok. V těchto zprávách jsou zveřejněny statisticky zpracované výsledky rozborů všech ukazatelů jakosti vody ze všech reálně naměřených hodnot ze všech oblastí České republiky za období daného roku v rámci pravidelných a povinných kontrol jakosti pitné vody. Jsou zde uvedena tato statistická data: minimální a maximální hodnota, aritmetický a geometrický průměr, medián, 10% kvantil a 90% kvantil a celkový počet hodnot, ze kterých byly tyto veličiny stanoveny. V roce 2019 byl ukazatel teplota měřen celkem při odběru 31 759 vzorků, což o více než 2500 odebraných vzorků víc, než tomu bylo v předchozích letech, kdy se celkový počet naměřených hodnot pohyboval v rozsahu od 26 917 (hodnota platná pro rok 2016) do 28 220 (hodnota platná pro rok 2018). V mezidobí se celkový počet hodnot mírně zvyšoval.

V následující tabulce jsou uvedeny maximální a minimální naměřené hodnoty a vypočítaná průměrná teplota stanovena jako aritmetický průměr.

Tab. 1 Maximální a průměrné hodnoty teploty vody v distribuční síti naměřené v České republice v období let 2015–2019 [2], [3], [4], [5], [6].

	Oblasti zásobující < 5000 obyvatel		Oblasti zásobující > 5000 obyvatel		Všechny oblasti	
	T_{\max} [°C]	$T_{\text{prům}}$ [°C]	T_{\max} [°C]	$T_{\text{prům}}$ [°C]	T_{\max} [°C]	$T_{\text{prům}}$ [°C]
2015	26,40	11,65	28,00 *	12,60	27,60 *	12,00
2016	33,00	11,57	27,60	12,50	33,00	11,93
2017	28,90	11,39	27,20	12,30	28,90	11,73
2018	32,00	12,02	28,00	12,85	32,00 _v	12,35
2019	27,20	11,72	30,40	12,60	30,40	12,05

* rozdíl hodnot je způsoben pravděpodobně rozdílným formátem zaokrouhlení hodnot ve zdroji.

Teplota pitné vody se může měnit v průběhu její distribuce od vodního zdroje až po kohoutek spotřebitele [7]. Snahou provozovatelů vodárenských systémů však je, aby se jakost (tedy všechny jakostní parametry pitné vody, včetně teploty) průtokem rozvodnou sítí neměnila a voda měla v ideálním případě stejné parametry, jako při odtoku z úpravny vody. Na jakost vody ovšem při její distribuci působí nespočet faktorů, mezi které řadíme například materiál a stáří potrubí, charakter vnitřních povrchů, se kterými je voda v dlouhodobém kontaktu a hydraulické podmínky ve vodovodní síti [8].

Ke změně teploty vody může dojít ve všech částech systému zásobování pitnou vodou. Ve zdrojích pitné vody nabývá voda počáteční teploty, která je odlišná v závislosti na typu vodního zdroje. Podzemní vody jsou obecně teplotně stálější, zatímco povrchové zdroje jsou ve větší míře závislé na okolních klimatických podmínkách. V případě zvýšené teploty vody v povrchovém zdroji – je-li to technicky možné, výběrem horizontu odběru surové vody můžeme hodnotu teploty ovlivnit (snížit). Při akumulaci vody ve vodojemech, může být teplota ovlivněna v závislosti na technickém stavu vodojemu, především na úrovni tepelné izolace konstrukce, a také době zdržení. Svou roli může v tomto případě i sehrát typ konstrukce (jedná-li se o vodojem podzemní nebo nadzemní). V distribuční síti (přivaděcích, řadech a přípojkách) může být teplota vody negativně ovlivněna (zvýšena) těmito faktory: nedostatečnou výškou krytí zeminy, typem zeminy, ve které je potrubí uloženo, nedodržením vzájemných vzdáleností od antropogenních zdrojů tepla (horkovody, teplovody, parovody), nevyhovující technický stav potrubí a nevhodné hydraulické podmínky v síti (vysoká doba zdržení vody v potrubí v kombinaci s výše uvedenými faktory) [7]. Ve vnitřních rozvodech pitné vody působí podobné faktory, jako v distribuční síti [9]. Významně se na zvýšení teploty vody ve vnitřních rozvodech pitné vody projevuje vliv nedostatečné tepelné izolace potrubí, které je kvůli tomu ohříváno teplým vzduchem vytápěných vnitřních prostor. Je prokázáno, že voda ve vnitřních rozvodech dosahuje teploty i nad 20 °C, a to i v případech, kdy je teplota vody v distribuční síti (přípojce nebo rozvodném řadu) výrazně nižší [10].

Negativní dopady zvýšené teploty vody na její jakost

Zvýšená teplota vody s sebou nese několik problémů, které v konečném důsledku mohou způsobit ztrátu statusu hygienické nezávadnosti pitné vody:

- Při konzumaci vody o teplotě blízké 0 °C dochází k potlačení sladké chuti [11].
- Při vyšších teplotách dochází ke zintenzivnění zápachu vody, který je způsoben obsahem odorantů ve vodě (tj. látek, které mají nepříjemný zápach za následek, jedná se například o vedlejší mikrobiologické produkty, dezinfekční činidla na bázi chloru a vedlejší produkty dezinfekce) [12].
- Při vyšší teplotě dochází k akceleraci průběhu chemických a biochemických reakcí [11].
- Zvýšením teploty vody dochází k urychlení procesu spotřeby a rozpadu chloru [11] a také k urychlení tvorby potenciálně zdraví škodlivých vedlejších produktů dezinfekce (trihalogenmethany a fenoly) [13].
- Voda o teplotě víc než 25 °C vytváří příznivější podmínky pro růst a rozvoj mikroorganismů, které jsou zachyceny v biofilmu na stěnách potrubí [14].
- Vyšší teploty mohou vytvářet příznivější podmínky také pro patogenní organismy, které se mohou zdržovat v jemném sedimentu na dně potrubí, a které se při náhle změně hydraulických podmínek (výrazné zvýšení průtočné rychlosti) mohou mobilizovat [15].

Nepříznivou kombinací zvýšené teploty vody s například vyšším obsahem organických látek způsobených nedokonalým procesem úpravy pitné vody může mít za následek zhoršení mikrobiologických ukazatelů.

2 STÁVAJÍCÍ METODIKA PRO MĚŘENÍ TEPLoty VODY

Metodika měření teploty vody při odběru vzorku pro stanovení jakosti pitné vody podléhá požadavků vyhlášky č. 252/2004 Sb., konkrétně § 7 Požadavky na odběr vzorků a metody rozboru [1], který se odkazuje na české technické normy:

- ČSN ISO 5667-5 Jakost vod. Odběr vzorků, část 5: Návod pro odběr vzorků pitné vody z úpraven vody a z vodovodních sítí [16].
- ČSN EN ISO 5667-3 Jakost vod. Odběr vzorků, část 3: Pokyny pro konzervaci vzorků a manipulaci s nimi [17].
- ČSN ISO 5667-14 Jakost vod. Odběr vzorků, část 14: Pokyny k zabezpečení jakosti odběru vzorků vod a manipulace s nimi [18].

Postup při stanovení vzorku teploty vody dle ČSN ISO 5667-5

ČSN ISO 5667-5 Jakost vod. Odběr vzorků, část 5 stanovuje zásady správného odběru vzorků pitné vody z vodovodních řadů a úpraven vody. Za zásadní část této normy z hlediska tématu práce je ta část, která popisuje proces čištění, dezinfekce a proplach před odběrem.

Čištění, dezinfekce a proplach před odběrem vzorků závisí na účelu odběru vzorku – pokud je kontrolována kvalita vody dodávána ke spotřebiteli proplach a čištění bodů odběru se provádí. Proplach se neprovádí, pokud je zkoumán například vliv materiálů na jakost vody nebo obecně změny jakosti průtokem vnitřními rozvody. Pak je vhodné odebírat vzorky po určité době stagnace, aby poskytl informace o stupni (resp. rychlosti), jakým materiály ovlivňují jakost vody nebo o maximálním pravděpodobném účinku [16].

Při odběru vzorků z vodojemů (podzemních i věžových) se před samotným odběrem nechá voda na 2–3 minuty volně odtékat, aby došlo k vypláchnutí stagnující vody ze vzorkovacího potrubí. Pokud by výše změněný interval nestačil, vypočítá se objem vody, který je nutné v potrubí vyměnit, odhadne se potřebná doba a vhodná rychlost a následně se použije pětinásobek vypočítané doby proplachu [16].

Při odběru vzorků z vodovodního kohoutku je postup obdobný jako při vzorkování vody z vodojemů. Pokud se nejedná o mikrobiologický odběr vzorku, tak se před odběrem odstraní všechny armatury, vyčistí se kohoutky (např. kusem látky smočené 2-propanolem nebo kartáčkem), a poté se provede proplach. Z kohoutku se po dobu 2-3 minut nechá odtékat konstantním průtokem stagnující voda. Proplach se ukončí až po ustálení teploty vytékající vody. Dále je v normě upozornění, že doba proplachu může trvat až 30 minut, a to například při odběru vzorku ze zaslepených odboček hlavní větve potrubí, kde může být usazený sediment, který je nutné před odběrem vzorku vypláchnout. Během odběru vzorku má být průtok vody kohoutkem stálý [16].

3 POPIS NAVRŽENÉ METODIKY

V praxi dochází ke stanovování teploty vody v distribuční síti odběrem vzorku podle jasně stanovených pravidel daných vyhláškou č. 252/2004 Sb., která odkazuje na příslušné normy ČSN. Ovšem na reálné distribuční síti se nevyskytuje konstantní měření teploty.

Navržená metodika spočívá na principu měření teploty vody skrz vnější stěnu potrubí. Výhodou tohoto způsobu měření jsou nízké pořizovací náklady – použitá teplotní čidla nečiní výraznou finanční zátěž, a při měření nedochází k porušení integrity systému, tj. nedochází k žádnému zásahu do vnitřního prostoru potrubí.

Parametry experimentu

Pro záznam byla použita teplotní čidla sestávající z těchto komponentů: teplotní sonda, teploměr, datalogger a propojovací kabel s polyethylenovou úpravou povrchu. Pro potřeby měření byl nastaven časový krok záznamu 30 s. Při této velikosti časového kroku již docházelo k detekovatelným změnám měřené teploty v řádech setin °C.

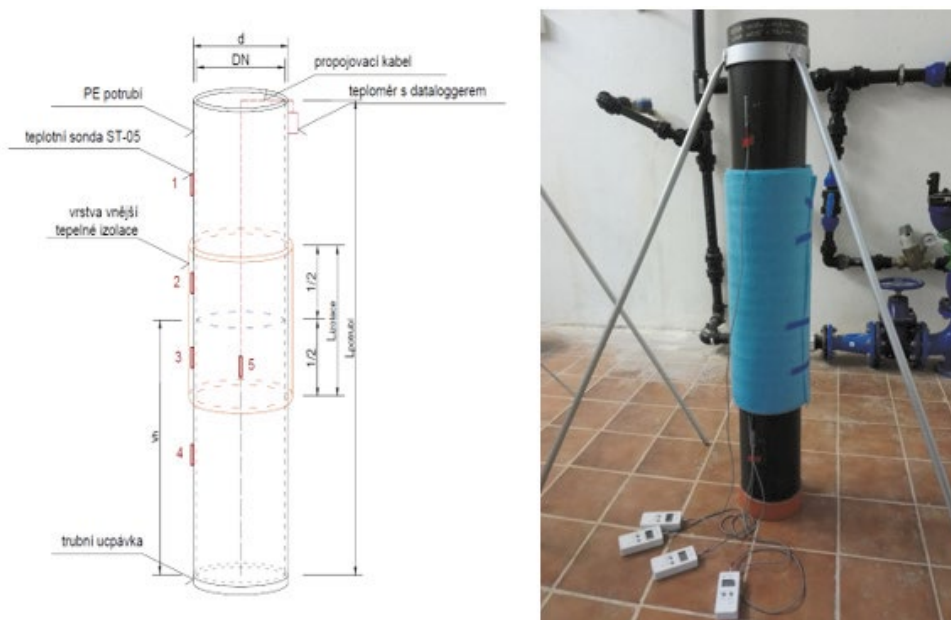
Teplotní sondy byly na stěnu potrubí umístěny podle schématu: potrubí – vrstva teplovodivé pasty teplotní čidlo (přípevněné na místě elektrotechnickou izolační páskou) – vrstva aluminiové fólie šířky 12 cm a tloušťky 15 µm pro zabránění přenosu vrstvy teplovodivé pasty na vnější vrstvu tepelné izolace – vrstva pěnové tepelné izolace.

Na měřeném úseku potrubí byla rozmístěna čidla vždy tak, aby alespoň 1 bylo:

- na vnější straně potrubí, nad úroveň hladiny vody uvnitř potrubí bez překrytí vrstvou vnější tepelné izolace (čidlo 1, v grafu STICK_1)

- na vnější straně potrubí, nad úrovní hladiny vody uvnitř potrubí a bylo překryto vrstvou vnější tepelné izolace (čidlo 2, v grafu STICK_2)
- na vnější straně potrubí, pod úrovní hladiny vody uvnitř potrubí a bylo překryto vrstvou vnější tepelné izolace (čidlo 3, v grafu STICK_3)
- na vnější straně potrubí, pod úrovní hladiny vody uvnitř potrubí bez překrytí vrstvou vnější tepelné izolace (čidlo 4, v grafu STICK_4)
- ponořeno pod hladinou vody uvnitř potrubí (čidlo 5, v grafu TEPLOTA VODY)

Rozmístění čidel je patrné na schématu a fotografiích z laboratoře (viz. Obr. 1). Současně byla snímána i teplota vzduchu v laboratoři (zelená křivka na Obr. 2). Potrubí bylo proti vychýlení nebo pádu zajištěno kovovou opěrnou konstrukcí tvořenou objímkou a 3 opěrami. Přesné schéma rozmístění čidel je patrné z následujícího schématu.



Obr. 1 Rozmístění teplotních čidel – schéma (vlevo), instalace teplotních čidel při laboratorním pokusu (vpravo).

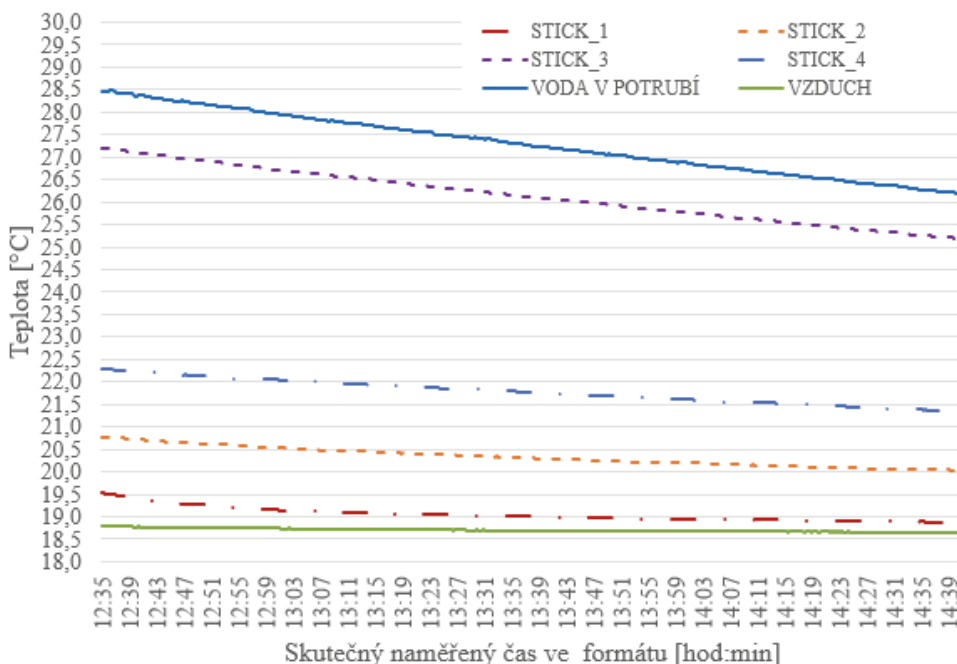
4 VÝSLEDKY

Cílem experimentu bylo stanovení návrhových rozměrů tepelné izolace a vhodného umístění teplotního čidla, tak aby došlo k co nejmenšímu rozdílu v naměřených hodnot čidla STICK_3 a skutečné teploty vody. Současně bylo ověřeno, že zvolená teplotní čidla jsou použitelná pro účel měření teploty vody skrz vnější stěnu potrubí.

Na základě naměřených hodnot lze konstatovat, že nejvhodnější umístění teplotního čidla je takové, kde je čidlo umístěno na vnější straně potrubí, pod úrovní hladiny vody uvnitř potrubí a je překryto vrstvou vnější tepelné izolace. Při instalaci v praxi na reálné vodovodní síti to znamená, že je vhodné umístit čidlo do spodní části potrubí, kde nebude docházet k sice ojedinělému, ale přesto možnému hromadění vzduchu. Problém se zavzdušněním potrubí by mohl nastat v případě neznalosti reálné distribuční sítě a výškových poměrů trasy vodovodního řádu, na kterém by čidlo bylo aplikováno.

Výsledný průběh teplot zaznamenaných čidly je vidět na Obr. 2. Modrá plná křivka (VODA V POTRUBÍ) zobrazuje průběh teploty vody, fialová čárkovaná křivka (STICK_3) znázorňuje změnu teplot v čase snímáných čidlem umístěným pod tepelnou izolací v místě styku s hladinou vody. Toto umístění čidla je aplikovatelné pro případ reálné studie. Modrá čerchovaná křivka (STICK_4) znázorňuje teploty snímáné čidlem umístěné ve spodní části měrného potrubí, v kontaktu s vodou přes stěnu potrubí, které nebylo opatřeno tepelnou izolací, pouze bylo ke stěně potrubí připevněno páskou pro zajištění celoplošné přilnavosti k povrchu potrubí. Červená čerchovaná křivka (STICK_1) zobrazuje průběh teploty čidla umístěného nad hladinou vody mimo vrstvu tepelné izolace. Její průběh je podobný relativně konstantnímu průběhu teploty vzduchu, který je znázorněn zelenou křivkou (VZDUCH). Dle původního předpokladu, tyto dvě křivky by měly být shodné. Jejich velikostní rozdíl je

pravděpodobně způsoben nedokonalou kalibrací čidla měřícího teplotu vzduchu a také mohlo dojít k částečnému přenosu tepla skrz stěnu potrubí. To potvrzuje i průběh oranžové čárkované křivky (STICK_2), která zobrazuje průběh teplot čidla nad hladinou vody pod tepelnou izolací. Toto čidlo bylo nepřímou ovlivňováno teplotou vody, která část své tepelné energie předávala potrubí.



Obr. 2. Průběh teplot vody v čase.

5 DISKUZE

Z výsledků vyplývá, že nejvhodnější umístění teplotního čidla je dle navržené metodiky, a sice na stěnu potrubí přes vrstvu teplovodivé pasty a opatření vnější tepelnou izolací, aby došlo k minimalizaci vlivu okolní teploty. Ovšem vrstva tepelné izolace nebyla dostačující, jelikož teplotní čidlo nebylo dostatečně izolováno od vnějšího prostředí. Rozdíl mezi skutečně naměřenou teplotou vody a naměřenou teplotou skrz stěnu potrubí je cca 1,5 °C.

Snímaná teplota čidla umístěného na stěně by se dle původního předpokladu měla v řádu několika minut přiblížit hodnotám teploty vody v potrubí a jejich rozdíl by neměl být větší, než jaká je velikost přijatelné odchylky těchto dvou parametrů.

Z praktického hlediska lze naměřený rozdíl považovat za přijatelný, ovšem jenom v případě, že tento způsob měření budeme brát pouze orientačně. Je patrné, že při stávajících parametrech pokusu (tj. s nedostatečnou tloušťkou vrstvy tepelné izolace) ukazuje čidlo nižší teplotu, než jaká je skutečná teplota vody. Takže pokud bychom vhodně zvolili referenční hodnotu teploty vody (např. 20 °C), jejíž dosažení by se dalo považovat za první upozornění možných následujících problémů, a předpokládali bychom, že při naměřené teplotě 21,5 °C je reálná teplota o cca 1,5 °C nižší, získali bychom tak hrubý přehled o reálném stavu. Pro potvrzení správnosti předpokladu by bylo následně vhodné odebrat vzorek (respektive změřit teplotu vody) z nejbližšího vodovodního kohoutku od místa umístění teplotních čidel vzorek pitné vody dle náležitostí vyhlášky č. 252/2004 Sb. a příslušných technických norem.

6 ZÁVĚR

Provedený experiment stanovil teoreticky nejlepší možnou aplikaci teplotního čidla na vodovodní potrubí. Dále bylo dokázáno, že vliv tepelné izolace, chránící teplotní čidlo od vlivu vnějšího prostředí není zanedbatelný a v provedeném pokusu nebyla vrstva izolantu dostačující. Teplota snímána čidlem z vnější strany potrubí měla v řádu několika hodin nabyt stejných hodnot jako teplota vody, což se nestalo ani po 2 hodinách měření.

Experiment nicméně prokázal vhodnost použití těchto teplotních čidel ve stávající instalaci pro orientační měření teploty vody na reálné distribuční síti.

Pro případ dalších studií se nabízí opakovat experiment s jiným rozmístěním čidel pro stanovení minimální velikosti přesahu tepelné izolace od čidla, pro stanovení potřebné tloušťky tepelné izolace, aby došlo k zabránění nebo alespoň výraznějšímu snížení vlivu vnějšího prostředí. Dále do sledování zahrnout také další trubní materiály, s jinou tepelnou vodivostí.

Poděkování

Tento článek byl vypracován v rámci projektu specifického výzkumu FAST-J-20-6431 s názvem "Aktuální problémy vodního hospodářství obcí".

Použité zdroje

- [1] Vyhláška č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody. In: Sběrka zákonů. 22.4.2004. ISSN 1211-1244.
- [2] Zpráva o kvalitě pitné vody v ČR za rok 2015. Praha: Státní zdravotní ústav, 2016.
- [3] Zpráva o kvalitě pitné vody v ČR za rok 2016. Praha: Státní zdravotní ústav, 2017.
- [4] Zpráva o kvalitě pitné vody v ČR za rok 2017. Praha: Státní zdravotní ústav, 2018.
- [5] Zpráva o kvalitě pitné vody v ČR za rok 2018. Praha: Státní zdravotní ústav, 2019.
- [6] Zpráva o kvalitě pitné vody v ČR za rok 2019. Praha: Státní zdravotní ústav, 2020.
- [7] Nováková, J.; Ručka, J. Teplota jako významný ukazatel jakosti vody ve vodovodní síti. In JUNIORSTAV 2020. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2020. s. 539-544. ISBN: 978-80-86433-73-8.
- [8] Liu, G., Zhang, Y., Knibbe W.J., Feng, C., Liu, W., Medema, G. and Van der Meer, W. Potential impacts of changing supply-water quality on drinking water distribution: A review. *Water Research*, March 2017, volume 116, pp 135-148. ISSN 0043-1354
- [9] Zlatanović, Lj., J.P. van der Hoek a J.H.G. Vreeburg. An experimental study on the influence of water stagnation and temperature change on water quality in a full-scale domestic drinking water system. *Water Research* [online]. 2017, 123, 761-772. DOI: 10.1016/j.watres.2017.07.019. ISSN 00431354
- [10] Proctor C. R., Hammes F. (2015). Drinking water microbiology-from measurement to management. *Curr. Opin. Biotechnol.* 33C 87–94. 10.1016/j.copbio.2014.12.014
- [11] Pitter, Pavel. *Hydrochemie. 5. aktualizované a doplněné vydání.* Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-928-0
- [12] Whelton, A.J. *Temperature Effects on Drinking Water Odor Perception.* Blacksburg, Virginia. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [13] Kooij, D. *Microbial Growth on Drinking – Water Supplies*, London: IWA Publishing. ISBN 978-17-8040-040-2
- [14] Sasek, J. *Biofilms and Water Distribution Systems.* Heating, Ventilation, Installation, February 2009, pp 87-88. ISSN 1210-1389
- [15] *Guidelines for Drinking-water Quality* [online]. 4th edition. Geneva: World Health Organization, 2011. ISBN 978-92-4-154815-1
- [16] ČSN ISO 5667-5 *Jakost vod. Odběr vzorků, část 5: Návod pro odběr vzorků pitné vody z úpraven vody a z vodovodních sítí.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2008. Třídící znak 757051.
- [17] ČSN EN ISO 5667-3 *Jakost vod. Odběr vzorků, část 3: Pokyny pro konzervaci vzorků a manipulaci s nimi.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2019. Třídící znak 757051.
- [18] ČSN ISO 5667-14 *Jakost vod. Odběr vzorků, část 14: Pokyny k zabezpečení jakosti odběru vzorků vod a manipulace s nimi.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2017. Třídící znak 757051.

VARIANTNÍ TESTOVÁNÍ ČIŠTĚNÍ A REKUPERACE TEPLA ŠEDÝCH ODPADNÍCH VOD

ALTERNATIVE TREATMENT AND HEAT RECOVERY OF GREYWATER

Kristýna Velikovská^{*1}, Ivo Korytář¹

^{*}velikovska.k@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně: Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Současný trend a udržitelný přístup ke snižování nebo eliminaci emisí oxidu uhličitého spočívá ve využívání obnovitelné energie. Podle ČSN EN 16147: 2011 představuje použití sprchy a vany přibližně 48-75 % z celkové potřeby teplé vody v domácnosti, v závislosti na velikosti a vybavení. [1] Někteří vlastníci a provozovatelé hledají nové způsoby recyklace odpadní vody, které mohou být v případě sběru teplé šedé vody (odpadní voda ze sprch, van, umyvadel) doplněny o získávání tepelné energie pro predehřev TUV nebo jako zdroj tepelné energie pro tepelná čerpadla.

Tento příspěvek se zabývá shrnutím postupů testování technologických celků v rámci projektu „Získávání a využití tepelné energie z odpadní vody v kombinaci s využitím vyčištěné vody“.

Klíčová slova

Odpadní voda, recyklace, rekuperace tepla

Abstract

The current trend and sustainable approach to reducing or eliminating carbon dioxide emissions lie in the use of renewable energy. According to ČSN EN 16147: 2011, the use of shower and bathtub accounts for approx. 48–75% of the total hot water demand, depending on the size and facilities of the household. [1] Some owners and operators are looking for new ways of recycling wastewater, which can be supplemented by obtaining thermal energy for preheating hot water or as a source of thermal energy for heat pumps in the case of hot greywater collection. This paper deals with a summary of laboratory procedures for testing technological units within the project „Collection and reuse of heat energy from wastewater, combined with the use of treated wastewater“.

Key words

Wastewater, recycling, heat recovery

1 ÚVOD

Role udržitelného hospodaření s vodou a tepelnou energií se z hlediska ochrany životního prostředí ve světě neustále zvyšuje. Přičemž efektivní rekuperací tepla z odpadní vody lze ušetřit až 40% celkové tepelné energie vyrobené v domácnostech, která představuje zdroj tepla opětovné využití energie pro jiné účely. [2] V rámci projektu "Získávání a využití tepelné energie z odpadní vody v kombinaci s využitím vyčištěné vody" je v současné době v laboratorních podmínkách na AdMaS VUT v Brně testována kombinace dvou technologických přístupů rekuperace tepla z odpadní vody společně jejím variantním vyčištěním na dvou technologických linkách a znovuvyužitím jako zdroje pro nepitné účely.

Předmětem testování jsou technologické (TG) celky složené ze sprchového koutu (zdroj šedé odpadní vody, dále ŠV), horizontálního tepelného výměníku ve vaničce sprchového koutu, pískové filtrace, membránové filtrace a spirálového tepelného výměníku v reaktoru membránové filtrační jednotky.

Cílem testování je ověření účinnosti čištění šedé vody (ČŠV) technologickým postupem s pískovou a membránovou filtrací (MBR – membránový bioreaktor) a ZZTOV pomocí tepelného výměníku ve sprchové vaničce (decentralizovaný systém) a spirálovým tepelným výměníkem v reaktoru membránové filtrační jednotky (centralizovaný systém). Na základě laboratorního testování je sestaven prototyp jednotky: tepelný výměník v kombinaci s technologií čištění odpadní vody pro testování v reálných podmínkách rodinného domu. Využití těchto technologií bude optimalizováno s ohledem na minimalizaci nákladů na jejich instalaci a maximalizaci

účinnosti zpětného zisku tepelné energie z OV. Cílem řešení projektu je technologický výrobek určený pro zpětné získávání tepelné energie (ZZTOV) z odpadních vod (v kombinaci s čištěním odpadních vod pro další využití).

Předmětem tohoto příspěvku je představení metodických postupů při řešení projektu a variantním testování technologie čištění a rekuperace tepelné energie z ŠV.

2 METODICKÝ POSTUP TESTOVÁNÍ

Laboratorní testování vyžaduje nejen návrh TG celků a vypracování projektové dokumentace, ale také stanovení metodického postupu pro zajištění provozuschopnosti testovací jednotky, definici sledovaných parametrů, četností a pokynů pro odběry vzorků a přístupu pro zpracování dat. Tato kapitola představuje stručný souhrn těchto pokynů.

Testovací kolo

Pro účely testování bylo definováno Testovací kolo (TK) s N-počtem ($N \geq 5$) sprchovacích cyklů (SC), které je dále charakterizováno konkrétní variantou zapojení TG celků. Po uplynutí každého TK je proveden fyzikální a chemický rozbor vzorků ŠV na přítoku ČŠV a vyčištěné bílé vody.

$$TK = N \times SC \quad (1)$$

Sprchovací cyklus krátký (SCK) je definován spotřebou vody 40 l a představuje 1/2 sprchovacího cyklu. Při maximálním průtoku vody $8 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ úspornou sprchovou hlavici je délka sprchovacího cyklu stanovena na 5 min.

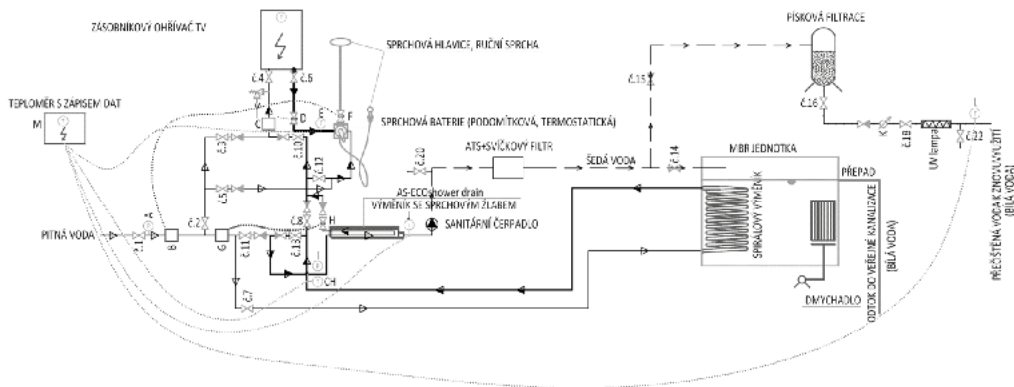
$$SCK = 0,5 \times SC \quad (2)$$

Sprchovací cyklus dlouhý (SCD) je definován spotřebou vody 80 l a představuje 1 sprchovací cyklus. Při maximálním průtoku vody $8 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ úspornou sprchovou hlavici je délka sprchovacího cyklu stanovena na 10 min

$$DSC = 1 \times SC \quad (3)$$

Základní technologické a ovládací prvky

Pro zajištění kontinuálního provozu v rámci testování TG celků je v sestavě instalován sprchový kout s horizontálním trubkovým tepelným výměníkem AS-ECOshower tray a MBR s integrovaným spirálovým výměníkem vč. dmychadla, přečerpávací jednotka se zaústěním na svíčkový filtr, pískový filtr, UV lampa, a především kompaktní ultrazvukové měřiče a teplotní čidla.



Obr. 1 Schéma zapojení technologických prvků do TG celků, legenda schéma je vlevo nahoře.

Technologické celky jsou kombinací ventilů, ultrazvukových průtokoměrů a teploměrů, manometrů a teplotních čidel po celé trase. Podle schématu zapojení celku (Obr. 1), má každý prvek své označení písmenem nebo číslem. Přečerpávací jednotka čerpá odpadní vodu z vaničky sprchového koutu variantně na pískový filtr (Obr. 2 vlevo) nebo do MBR (Obr. 2 vpravo).



Obr. 2 Vlevo fotografie sprchového koutu a pískového filtru testovacího celku, vpravo detail provzdušňování MBR, fotografie pořízené na AdMaS VUT v Brně.

Odběry a rozborů vzorků

V rámci jednotlivých variant zapojení TG celku je testována účinnost ČŠV, pro jejíž vyhodnocení je prováděn fyzikální, chemický a mikrobiologický rozbor.

Testované ukazatele jsou rozděleny do dvou skupin (A, B) dle tabulky Tab. 1, jejichž analýza je prováděna z jednoho společného vzorku na Fakultě chemické VUT v Brně.

Tab. 1 Tabulka rozdělení skupin testovaných ukazatelů

Skup.	Ukazatel
A	pH, Barva, Zákal, BSK5, CHSKCr, Nerozpuštěné látky, Amonné ionty NH_4^+ , Dusičnanové ionty NO_3^- , Fosforečnany
B	Enterokoky, Koliformní bakterie a Escherichia coli, Salmonela, Pseudomonas Aeruginosa

Po odebrání vzorků je však nutné okamžitě provést jejich analýzu a stanovit pH [-], teplotu [$^{\circ}\text{C}$], redox potenciál U [mV], salinitu [-], konduktivitu [$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$] a specifický odpor [$\Omega\cdot\text{cm}$]. Pro analýzu těchto ukazatelů je využíván laboratorní měřič s pH a ORP elektrodami a vodivostní elektrodovou celou.

3 VARIANTY TESTOVÁNÍ TECHNOLOGICKÝCH CELKŮ

Sprchový kout se zabudovaným výměníkem odvádí šedou vodu do přečerpávací jednotky, která následně distribuuje OV přes svíчковý filtr variantně na čištění pomocí:

- pískového filtru (ČŠV PF);
- membránové jednotky s integrovaným spirálovým výměníkem (MBR jednotka – ČŠV MBR).

Rozdělovací prvek obou větví je řešen pomocí kulových ventilů. Ty jsou propojeny reakční pákou pro zajištění průchodnosti systému.

ČŠV PF: OV je dopravována do distribučního potrubí, které má za sebou ve stejné rozteči „vypouštěcí“ otvory. Díky tomuto systému vstupuje odpadní voda do pískového filtru rovnoměrně po celé ploše filtru. Následně protéká odpadní šedá voda přes sorpční náplň. Součástí pískového filtru je odtoková komora pro odběr vzorků.

ČŠV MBR: V reakční nádrži je osazen membránový modul, v jehož spodní části je zaústěn aerační systém. Nad membránovým modulem je umístěno čerpadlo, které podtlakem odsává vodu přes membrány a odvádí již

vyčištěnou vodu do odtokového potrubí. Impulz odtahu je dán plovákovým senzorem. Za výtlakem z nádrže je umístěno odběrné místo.

Vyčištěná bílá voda dále ústí do odpadu přes lopatkový vodoměr a následnou UV lampu zajišťující tzv. terciární čištění – hygienizaci. Za UV lampou je umístěné, v systému poslední, odběrné místo pro porovnání kvality bílé vody po terciálním čištění.

V testovacím režimu je dále uvažováno se třemi způsoby přívodu pitné a teplé užitkové vody do sprchy. Pomocí kulových ventilů je voda usměrňována na požadované nastavení. Ve všech způsobech zapojení je sledován průtok a teplota pomocí kompaktního ultrazvukového měřiče. Jednotlivé způsoby zapojení přívodu pitné a teplé užitkové vody jsou v rámci TG celku označeny barevnými šipkami následovně:

- přívod pitné vody bez rekuperace tepla;
- přívod přes horizontální sprchový výměník tepla;
- přívod přes spirálový výměník tepla s možností trasy přes horizontální sprchový výměník tepla.

Přívod pitné vody bez rekuperace

Základním nastavením je přímý přívod vody z řadu do elektrického bojleru. Trasa tohoto přívodu je označena bílými šipkami s černým obrysem (Obr. 3 vlevo). Ostatní větve jsou uzavřeny kulovými ventily pro zajištění správného toku média.

Jedná se o běžný koncept zapojení sprcha + boiler bez využití odpadního tepla. V rámci projektu slouží daná dispozice k získání základních údajů pro srovnávání účinností jednotlivých tepelných výměníků.

Přívod přes sprchový výměník tepla

Černě označená trasa přivádí pitnou vodu z řadu přes horizontální výměník (Obr. 5 uprostřed). Předehřátá voda je následně přiváděna variantně:

- A: přímo do zdroje tepla – elektrického bojleru;
- B: přímo do baterie;
- C: kombinace variant A i B.

U varianty A je uzavřený ventil před šedou šipkou s černým obrysem směřující do termostatické sprchové hlavice. Otevřena je tedy pouze černými šipkami označená trasa.

V případě varianty B je uzavřena část trasy se černými šipkami za úrovní šedé šipky s černým obrysem. Varianta C by měla zajišťovat neefektivnější využití tepelného horizontálního výměníku. V této variantě jsou otevřeny, jak černá, tak šedá s černým obrysem.

Přívod přes spirálový výměník tepla (s možností kombinace se sprchovým výměníkem tepelné energie)

Trasa směřující do spirálového výměníku je označena šedými šipkami (Obr. 5 vpravo). Nejprve se pitná voda z řadu předehřívá ve výměňkové spirále umístěné v membránové jednotce čistící šedou odpadní vodu.

Předehřátá voda je přiváděna variantně:

- D: přímo do zdroje tepla – elektrického bojleru;
- E: přímo do baterie (šedá šipka s černým obrysem);
- F: kombinace variant D i E.

U varianty D je uzavřený ventil před šedou šipkou s černým obrysem šipkou směřující do termostatické sprchové hlavice. Otevřena je tedy pouze černými šipkami označená trasa. V případě varianty E je uzavřena část trasy se černými šipkami za úrovní zelené šipky. Varianta F by měla zajišťovat neefektivnější využití spirálového tepelného výměníku.

Další výměňková trasa přívodu pitné vody do spirálového výměníku vede v kombinaci přes horizontální výměník trasou označenou kombinací šedých a černých šipek. Za horizontálním výměníkem je kombinovaně předehřátá voda následně přiváděna variantně:

- G: přímo do zdroje tepla – elektrického bojleru;
- H: přímo do baterie (šedá šipka s černým obrysem);
- I: kombinace variant G i H.



Obr. 3 Variantní zapojení systému rekuperace v rámci TG celků (vlevo bílá trasa, uprostřed černá trasa, vpravo šedá trasa), fotografie pořízené na AdMaS VUT v Brně.

4 ZÁVĚR

Aplikace technologie znovuvyužití odpadní vody představuje ekonomické a ekologické hospodaření s vodou s významnou úsporou pitné vody a tepelné energie. Příspěvek popisuje průběh laboratorního testování technologických celků zahrnujících variantní zapojení technologie čištění a rekuperace tepla z odpadní vody v prostorách AdMaS VUT v Brně. Na základě výsledků z testování je navržen a sestaven prototyp zařízení kombinující oba přístupy k znovuvyužití odpadní vody, který je dále testován v reálném provozu.

Poděkování

Tento článek byl vytvořen s finanční podporou TA ČR v rámci řešení projektu TJ02000190 Získávání a využití tepelné energie z odpadní vody v kombinaci s využitím vyčištěné vody a finanční podporou Vysokého učení technického v Brně v rámci řešení standardního specifického projektu FAST-S-20-6314 Vybrané problémy vodního hospodářství měst a obcí.

Použité zdroje

- [1] ČSN EN 16147. Tepelná čerpadla s elektricky poháněnými kompresory – Zkoušení, hodnocení výkonnosti a požadavky na značení jednotek pro teplou užitkovou vodu. Česká technická norma (ČSN), 2018.
- [2] ŠEVELA, Pavel. Zpětné získávání tepla z odpadní vody - ZZTOV: Principy a doporučení pro plánování pro lokální jednotky. In: Asionále 2018 [online]. 12.4.2018, s. 10

ZMĚNA ODTOKU VODY V ZÁVISLOSTI NA TVARU PODTLAKOVÉHO VTOKU

CHANGE OF WATER OUTFLOW DEPENDING ON THE SHAPE OF THE SIPHONIC DRAIN

David Fučík^{*1}, Jan Ručka¹

^{*}fucik.d@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Článek popisuje změnu odtoku vody v závislosti na tvaru podtlakového vtoku. Pro několik vybraných tvarů podtlakových vtoků bylo provedeno měření hydraulické kapacity v závislosti na výšce vzduť vody na desce, která simuluje střechu a je umístěna v zásobní nádrži. Pro každý vtok byla vykreslena odtoková křivka, ze které je patrna i maximální hydraulická kapacita, která vychází k okrajových podmínek laboratorního měřicího zařízení. Pro účely porovnání byly zaznamenány fotografie proudění vody v potrubí i nad úrovní simulované střechy. Záznam byl proveden pro všechny měřené vtoky a také pro každou výšku vzduť.

Klíčová slova

Podtlakový systém odvodnění, střešní vtok, hydraulická kapacita

Abstract

The article describes the change of water outflow depending on the shape of the siphonic drain. For several selected shapes of siphonic drains, the hydraulic capacity was measured depending on the height of the water on the board, which simulates the roof and is located in the storage tank. An outflow curve was plotted for each inlet, from which the maximum hydraulic capacity is evident, which is based on the boundary conditions of the laboratory measuring device. For comparison purposes, photographs of water flow in the pipeline and above the level of the simulated roof were recorded. Recording was performed for all measured drains and also for each height of water.

Key words

Siphonic drainage system, roof drain, hydraulic capacity

1 ÚVOD

Cílem práce bylo nalezení optimálního tvaru podtlakového vtoku. Pro účely testování byly navrženy tři varianty podtlakových vtoků. Tyto vtoky byly testovány na měřicím zařízení, které je popsáno níže. Pro vtoky byla měřena hydraulická kapacita při stanovených výškách vzduť vody na simulované střeše. Při testování vtoků byly také sledovány hydraulické poměry v transparentním odtokovém potrubí. Hydraulické poměry v potrubí byly sledovány pro určení výšky vzduť vody, při kterém nastává, v potrubí, plný průtok.

2 POPIS PODTLAKOVÉHO VTOKU

Obecně podtlakový vtok vychází z gravitačního vtoku. Rozdíl mezi nimi je vzduchová přepážka, která je pro podtlakový vtok velmi důležitá. Vzduchová přepážka zabraňuje strhávání vzduchu do vtoku a následně tedy do celé trasy potrubí [1]. Vzduchová přepážka zamezuje tvorbě víru nad vtokem, který by nasával vzduch do systému [2]. Vznik podtlakového odvodnění je standardně doprovázen čtyřmi fázemi proudění vody v systému. První z nich je gravitační průtok, druhá je pístový průtok, třetí je bublinkový průtok a poslední, tj. čtvrtá fáze je plný průtok. Vnikání vzduchu do systému je doprovázeno silným hlukem, který má nejvyšší úroveň v okolí třetí fáze. Důvodem je to, že na odtok vody působí podtlakový efekt, což má za následek vyšší rychlosti proudění vody v potrubí, tedy i na nátokové hraně vtoku. U nátoky se vzduch dostává spolu s vodou do vtoku, a to v poměru

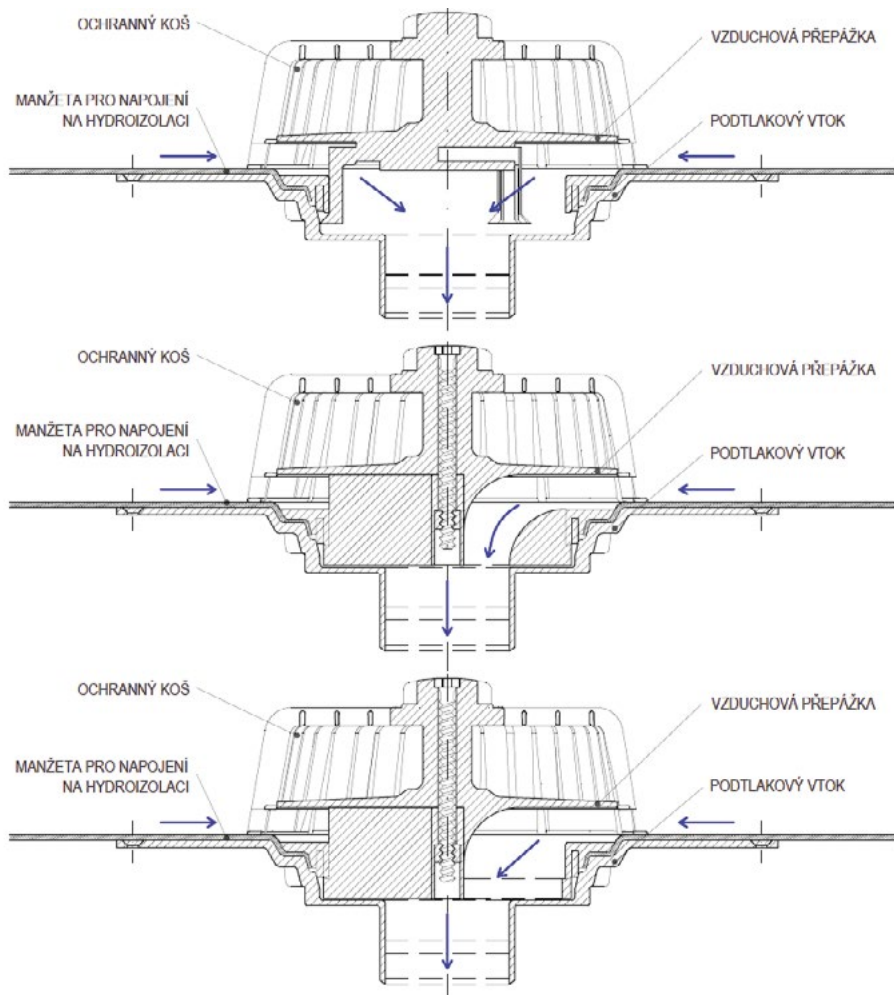
vzduchu a vody zhruba 5 % : 95 % [3]. Při vytvoření podtlakového efektu dochází ke snížení hodnoty tlaku, a to až pod hodnotu tlaku atmosférického [4].

Popis variant

První varianta podtlakového vtoku vychází, stejně jako další dvě varianty, z gravitačního vtoku. U této varianty byl upraven pouze ochranný koš vtoku a to tak, že byl doplněn o vzduchovou přepážku. Průměr vzduchové přepážky je 189 mm a je umístěna 14 mm nad úroveň hydroizolační fólie vtoku. Ochranný koš se vzduchovou přepážkou je ke vtoku uchycený pomocí tří pacek, které se při otočení zachytí za přírubu vtoku viz Obr. 1.

U druhé varianty byla také osazena vzduchová přepážka se shodnými parametry jako u varianty první. U této varianty byla sestava vtoku doplněna o další část, která byla zalisovaná mezi tělo vtoku a mezi jeho přírubu. Tato varianta usměřňuje proud vody pomocí přelivné plochy, která vede od přelivné hrany vtoku po nátok do odtokového potrubí vtoku. Prvek byl dále osazen symetricky třemi lamely, které směřují do osy vtoku. Spojení lamel v ose vtoku dále slouží pro uchycení ochranného koše a vzduchové přepážky k tělu vtoku. Sestava je patrná z Obr. 1.

Třetí varianta vychází z varianty druhé. Rozdíl oproti druhé variantě tkví v tom, že u části, která je zalisovaná mezi tělo vtoku a přírubu vtoku, není přelivná plocha. Část je osazena pouze lamely, které směřují do osy vtoku viz Obr. 1.



Obr. 1 Řezy podtlakových vtoků (varianta 1–3).

3 METODIKA

Norma ČSN EN 1253-2 Podlahové vpusti a střešní vtoky - Část 2: Střešní vtoky a podlahové vpusti bez zápachové uzávěrky (2016) definuje, že zkouška může být prováděna s deskou simulující plochu střechy nebo bez ní. Nulový bod, pro měření výšky vzduť vody nad vtokem, musí být v úrovni, kdy voda začne vtékat do střešního vtoku. Měřicí body pro výšku vzduť hladiny vody musí být vzdáleny od svislé osy vtoku 500 mm \pm 5 mm. Výška vzduť je vertikální vzdálenost mezi úrovní nulového bodu a úrovní hladiny měřené v měřicím bodě. Předpokládá se, že plného průtoku je dosaženo v bodě, kdy se zvyšující se tlakovou výškou, tzn. výškou vzduť, se neočekává zvýšení průtoku a nelze pozorovat vstup vzduchu do potrubí. Pro účely pozorování se proto používá transparentní potrubí. Zkouška může být provedena s uzávěrem nebo bez uzávěru na konci odtokového potrubí. V případě použití uzávěru se délka a průměr potrubí zvolí tak, aby bylo dosaženo maximálního průtoku, který lze očekávat při plném plnění s potrubím stejného DN/ID. Tolerance pro výšku vzduť může být \pm 2 mm [5].

Průběh testování

Testování navržených variant podtlakových vtoků probíhalo na navrženém měřicím zařízení. To se skládá z nosné konstrukce celého systému. Ze spodní nádrže o průměru 1500 mm a výšce 1500 mm a z horní nádrže o rozměrech 1800 \times 1800 \times 500 mm. Horní nádrž je plněná z dolní nádrže pomocí čerpadla a výtlačného řadu. Na výtlačné větvi je umístěn průtokoměr. Odtokové potrubí je vedeno zpět do dolní nádrže.

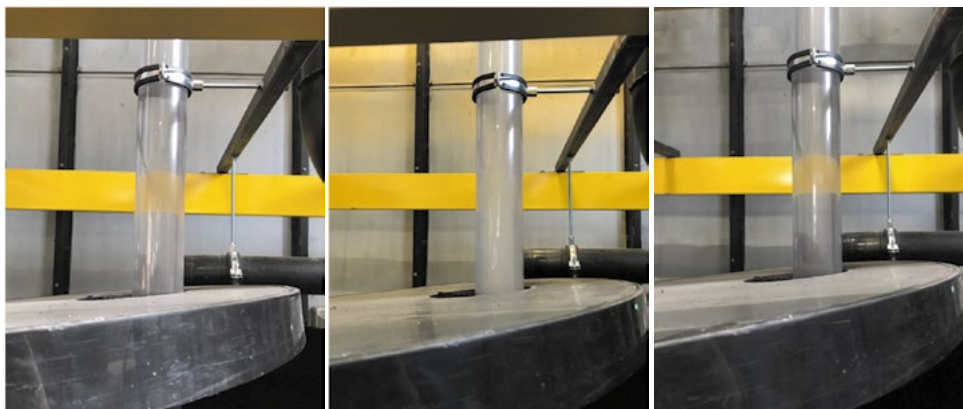
Pro varianty podtlakových vtoků byly zaznamenány hodnoty průtoku pro předem definované výšky vzduť vody na simulované střeše. Průtok byl měřen ve výškách 5 mm, 15 mm, 25 mm, 35 mm, 45 mm, 55 mm a 100 mm.

Výška vzduť vody byla měřena 50 mm od hrany kruhové desky, která simuluje plochu střechy, tzn. dochází k ustálení přítoku vody ke vtoku. Tato deska má průměr 1000 mm a je osazena v horní nádrži spolu s vtokem.

Hodnota průtoku byla zaznamenávána z průtokoměru DN 150, který je osazený na výtlačném potrubí. Měření probíhalo 10 minut od ustálení výšky vzduť, během kterých bylo zaznamenáno 11 hodnot (1 hodnota \cdot min⁻¹). Tento interval byl opakován pro každou měřenou výšku vzduť vody a také pro další varianty podtlakových vtoků. Z naměřených hodnot byl následně vypočten aritmetický průměr, který spolu s výškou vzduť vody vstupuje do grafu odtokové křivky viz níže.

4 VÝSLEDKY

Níže uvedené fotografie (Obr. 2.) znázorňují proudění vody v odtokovém potrubí při výšce vzduť vody 55 mm na simulované střeše. Plný průtok, kdy se do systému nedostává vzduch, je patrný z levé a pravé části obrázku (první a třetí varianta podtlakového vtoku). Při plném průtoku je potrubí s proudící vodou zcela průhledné (lze přes něj vidět zakrytou část žlutého nosníku). Ve střední části obrázku je znázorněna druhá varianta podtlakového vtoku. U této varianty není potrubí průhledné (zakrytá část žlutého nosníku není vidět). Tato fáze proudění se označuje jako bublinkový průtok. Díky vytvořenému podtlakovému efektu je v této fázi dosaženo vysokých rychlostí proudění vody v systému, ale je v něm stále přítomné velké množství vzduchových bublin.



Obr. 2 Pohled na transparentní část odtokového potrubí při testování hydraulické kapacity vtoků při výšce vzduť 55 mm (varianta 1–3).

Uvedené tabulky představují naměřená data z průběhu testování jednotlivých variant podtlakových vtoků. První sloupec tabulky značí výšku vzdutí vody nad přelivnou hranou. Jednotlivé řádky hodnot představují data odečtených průtoků, které byly odečítány z průtokoměru po 1 minutě. V posledním sloupci je uvedena průměrná hodnota, která vstupuje, spolu s výškou vzdutí vody, do grafu viz Obr. 3.

Tab. 1 Naměřená hodnota průtoku pro 1. variantu vtoku [$l \cdot s^{-1}$]

Vzdutí vody [mm]	0. min	1. min	2. min	3. min	4. min	5. min	6. min	7. min	8. min	9. min	10. min	Průměr
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,46	1,62	1,69	1,64	1,50	1,40	1,32	1,31	1,13	1,47	1,25	1,44
15	3,37	4,01	3,61	3,60	3,55	3,42	3,54	3,25	3,46	3,38	3,54	3,52
25	7,75	7,50	7,35	7,51	7,25	6,79	7,62	7,16	7,37	7,01	7,52	7,35
35	14,19	13,89	14,45	14,05	14,05	14,48	14,30	14,06	14,27	14,46	14,20	14,22
45	16,63	17,03	16,75	16,55	17,08	16,31	16,89	16,52	16,99	16,82	16,58	16,74
55	16,89	16,95	17,11	17,22	17,03	16,83	17,44	16,75	17,16	17,01	17,00	17,03
100	17,09	17,60	16,96	17,21	17,83	17,11	16,86	16,63	16,99	17,06	17,11	17,13

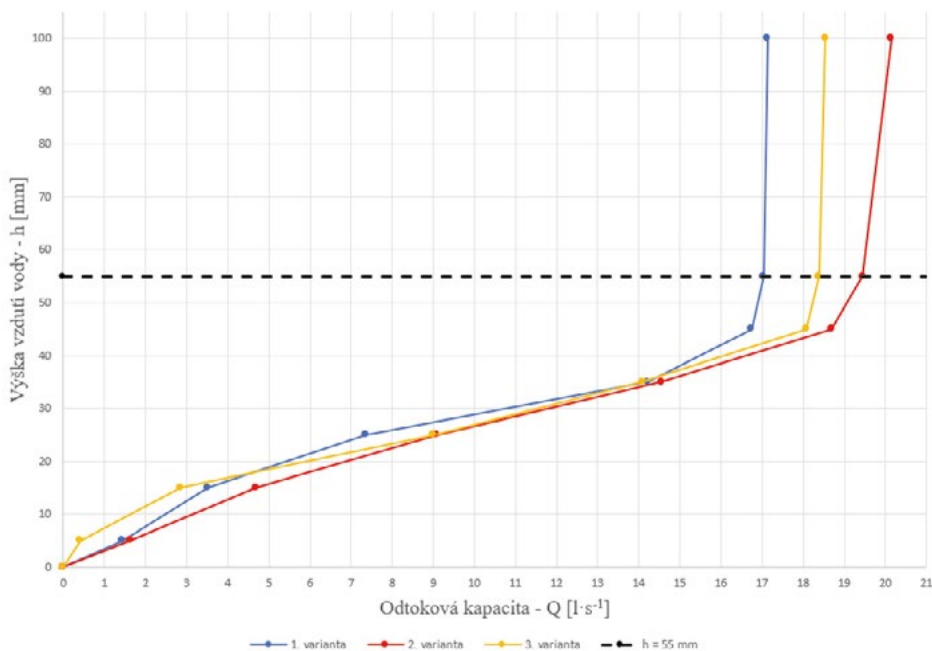
Tab. 2 Naměřená hodnota průtoku pro 2. variantu vtoku [$l \cdot s^{-1}$]

Vzdutí vody [mm]	0. min	1. min	2. min	3. min	4. min	5. min	6. min	7. min	8. min	9. min	10. min	Průměr
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,77	1,83	1,45	1,41	1,73	1,51	1,77	1,71	1,54	1,51	1,55	1,62
15	4,79	4,90	4,77	4,72	4,98	4,97	4,69	4,60	4,22	4,50	4,54	4,70
25	9,03	9,15	9,12	9,03	9,08	9,22	9,08	9,19	8,96	8,89	9,16	9,08
35	14,75	14,37	14,47	14,72	14,89	14,53	14,43	14,44	14,67	14,39	14,40	14,55
45	18,97	18,81	18,63	18,62	18,57	18,80	18,73	18,47	18,60	18,88	18,41	18,68
55	19,47	19,48	19,44	19,53	19,52	19,35	19,37	19,53	19,51	19,22	19,41	19,44
100	20,25	20,19	20,46	19,97	20,02	20,15	20,35	20,01	20,02	20,08	20,09	20,14

Tab. 3 Naměřená hodnota průtoku pro 3. variantu vtoku [$l \cdot s^{-1}$]

Vzdutí vody [mm]	0. min	1. min	2. min	3. min	4. min	5. min	6. min	7. min	8. min	9. min	10. min	Průměr
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,30	0,50	0,38	0,39	0,55	0,42	0,30	0,30	0,56	0,38	0,44	0,41
15	2,92	2,93	2,89	2,82	2,95	2,93	2,84	2,95	2,65	2,74	2,80	2,86
25	9,06	8,96	9,19	8,94	9,05	8,87	9,05	8,73	9,04	9,15	9,03	9,01
35	14,30	13,93	14,11	13,82	14,12	14,21	14,08	14,05	14,15	14,13	14,06	14,09
45	18,11	18,23	17,96	18,06	18,10	18,23	18,07	17,97	18,21	18,01	17,84	18,07
55	18,47	18,30	18,12	18,46	18,42	18,37	18,64	18,49	18,49	18,28	18,13	18,38
100	18,27	18,46	18,64	18,64	18,50	18,32	18,67	18,52	18,88	18,52	18,53	18,54

Obr. 3 znázorňuje odtokové křivky pro všechny varianty testovaných podtlakových vtoků. Osa X představuje hydraulickou kapacitu Q v $l \cdot s^{-1}$ a osa Y výšku vzdutí vody h v mm. V grafu je vyznačeno vzdutí vody ve výšce 55 mm, což je hodnota, při které má být, dle normy, podtlakový vtok testován a dále musí splnit minimální hodnotu odtoku, která činí $12,00 l \cdot s^{-1}$ [5].



Obr. 3 Odtokové křivky (varianta 1–3).

5 DISKUZE

Při srovnání variant navržených podtlakových vtoků lze konstatovat, že druhá varianta má nejvyšší hydraulickou kapacitu, ta činí $20,14 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Hydraulická kapacita pro první variantu je $17,13 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ a hodnota pro třetí variantu je pak $18,54 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Pokud srovnáme nejvyšší a střední hodnotu hydraulické kapacity, dostaneme rozdíl $1,60 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ což odpovídá 7,94% poklesu v hydraulické kapacitě. Pokud srovnáme nejvyšší a nejnižší hodnotu hydraulické kapacity, dostaneme rozdíl $3,01 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ což odpovídá 14,95% poklesu v hydraulické kapacitě.

Při srovnání hydraulických poměrů je na tom nejlépe první varianta, při které dochází k plnému průtoku vody v potrubí při výšce vzdutní vody nižší než 55 mm. U druhé varianty bylo dosaženo plného průtoku vody v potrubí až při výšce 65–75 mm. Dosažení plného průtoku až při těchto výškách je pravděpodobně způsobeno vysokou nátokovou rychlostí vody do vtoku, která strhává část okolního vzduchu. Nátok může být také ovlivněn turbulencemi, které mohou vznikat u spáry, která odděluje přírubu vtoku a zalisovanou část s přelivnou plochou. U třetí varianty bylo dosaženo plného průtoku vody v potrubí při výšce cca 55 mm.

Podtlakový efekt obecně nastává již při nižších výškách zatopení (menší než 55 mm), o čemž vypovídají i naměřené průtoky. Vnik vzduchu do systému je však doprovázen silným hlukem a vibracemi, které nejsou žádoucí.

Při srovnání hydraulické kapacity pro první a třetí vtok, lze konstatovat, že trojice lamel usměrňuje odtok vody a zvyšuje tak hydraulickou kapacitu vtoku.

6 ZÁVĚR

Z výše navržených a testovaných variant podtlakových vtoků, pro které byly testovány hydraulické kapacity, vychází nejlépe třetí varianta. Tato varianta splňuje podmínku minimálního průtoku $12,00 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, která je stanovena normou ČSN EN 1253-2. Tato podmínka je platná pro výšku vzdutní vody 55 mm. Podtlakový vtok, při této výšce vzdutní, splňuje plný průtok v odtokovém potrubí, při kterém dochází ke snížení míry hluku nad vtokem oproti částečnému průtoku. První varianta podtlakového vtoku také splňuje dané podmínky, avšak hydraulická kapacita je nižší ve srovnání se třetí variantou. Druhá varianta podtlakového vtoku splňuje pouze hydraulickou kapacitu, plného průtoku, při vzdutní vody 55 mm, bohužel není dosaženo. Z toho důvodu se tato varianta jeví jako nevhodná.

Pro zlepšení dosavadních dat bude probíhat další testování podtlakových vtoků. Další výzkumná činnost bude zaměřena na míru hluku, který vzniká při odtoku vody podtlakovým vtokem.

Poděkování

Práce byla financována z rozpočtu projektu „Aktuální problémy vodního hospodářství obcí“, registrační číslo FAST-J-20-6431, který je financován z programu Specifického vysokoškolského výzkumu Vysokého učení technického v Brně.

Použité zdroje

- [1] LUCKE, Terry a Simon BEECHAM. Alternative low-cost overflows for siphonic roof drainage systems: Proof of concept. *Journal of Building Engineering*. 2015, 2, 9-16.
- [2] LUCKE, Terry, Simon BEECHAM a George ZILLANTE. Rainwater harvesting options for commercial buildings using siphonic roof drainage systems----Lessons for Building Surveyors. Conference Paper. Australian Institution of Building Surveyors Conference, 2007.
- [3] SCHILHART, Eduard. Navrhování odvodnění plochých střech 2. Podtlakové systémy. Materiály pro stavbu [online]. 2017 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.topwet.cz/upload/data/cz/files/navrhovani-odvodneni-plochych-strech-2.pdf>
- [4] RUNŠTUK, Michal. Odvodnění plochých střech: gravitační, nebo podtlakový systém? Materiály pro stavbu. 2015.
- [5] ČSN EN 1253-2. Podlahové vpusti a střešní vtoky: Část 2: Střešní vtoky a podlahové vpusti bez zápachové uzávěrky. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

VPLYV DAŽĎOVÉHO ODTOKU NA HYDRAULICKÉ PODMIENKY KANALIZAČNÉHO ZBERAČA

ANALYSIS OF THE STORMWATER RUNOFF IMPACT ON THE HYDRAULIC CONDITIONS OF THE SEWER COLLECTOR

Réka Wittmanová*¹ Štefan Stanko¹

*reka.wittmanova@stuba.sk

¹ Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra zdravotného a environmentálneho inžinierstva, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Abstrakt

Stokové siete tvoria spojovací článok medzi prírodným vodným cyklom a vodným cyklom v zastavanom území. Rozvojom urbanizácie sa postupne menia hydrologické charakteristiky mestských území. Objem dažďového odtoku do stokovej siete sa zvyšuje nárastom nepriepustných plôch. Cieľom príspevku je priblížiť súčasné problémy na stokovej sieti spôsobené výraznými zrážkami. Vybraná stoková sieť bude posudzovaná dvoma zaťažovacími stavmi. Zaťažovací stav SCA bude slúžiť na posúdenie aktuálneho stavu siete a bude zaťažená návrhovým blokovým dažďom s trvaním 15 minút a s periodicitou $p = 0,5$. Druhý zaťažovací stav SCB sa bude zameriavať na pôsobenie zvýšeného objemu dažďového odtoku pri návrhovom daždi s periodicitou $p = 0,1$.

Kľúčová slova

Dažďový odtok, jednotná stoková sieť, hydraulické podmienky

Abstract

Sewerage networks form a connection between the natural water cycle and the water cycle in the built-up areas. The hydrological characteristics of urban areas are gradually changing with the development of urbanization. The volume of stormwater runoff into the sewer network increases with the expansion of impermeable surfaces in the cities. The aim of this paper is to approach the current problems on the sewer network caused by heavy precipitation events. The selected sewer collector will be assessed in two scenarios. The first load case SCA will be used to assess the current state of the network and will be loaded with a design block rain with a duration of 15 minutes and a periodicity of $p = 0.5$. The second load case SCB will focus on the effect of the increased volume of stormwater runoff in the design rain with a periodicity $p = 0.1$.

Key words

Stormwater runoff, combined sewer network, hydraulic conditions

1 ÚVOD

Stokové siete tvoria neoddeliteľnú súčasť mestskej infraštruktúry. Predstavujú komplexný systém zberu, transportu a čistenia odpadových vôd (splaškových aj dažďových vôd), ktorý má významný ekonomický, sociálny a environmentálny vplyv na mestské prostredie. Tvoria spojovací článok medzi prírodným vodným cyklom a vodným cyklom v zastavanom prostredí. Správne navrhnuté a prevádzkované stokové siete sú schopné obmedziť vznik lokálnych povodní a odľahčenie odpadových vôd do recipientu, a tým udržiavať životné prostredie na požadovanej úrovni [1], [2].

Cieľom tejto práce je priblížiť súčasné problémy v prevádzke stokových sietí počas výrazných dažďových udalostí. Modelovaný zberač je súčasťou jednotnej stokovej siete mesta Trnava a bude posudzovaný dvoma zaťažovacími stavmi. Prvý zaťažovací stav bude hodnotiť aktuálne hydraulické podmienky siete a ako návrhový dážď bude použitý 15 minútový blokový dážď s periodicitou $p = 0,5$. Tento návrhový dážď sa používa aj pri návrhu stokových sietí podľa normy STN EN 75 6101. Druhý zaťažovací stav bude hodnotiť hydraulické podmienky siete pri pôsobení dažďa s periodicitou $p = 0,1$.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Zaužívaný spôsob nakladania s dažďovými vodami v mestách bol založený na koncepcii najrýchlejšieho odvedenia dažďových vôd z urbanizovaného územia. Vzhľadom na zmeny v hydrologických a hydrogeologických parametroch mestských povodí sa táto koncepcia časom prejavila ako nedostačujúca, [3], [4].

Dôsledkom klimatických zmien vznikajú situácie, keď už hydraulické podmienky v stokových sieťach nie sú zabezpečiť bezproblémovú prevádzku. Preťaženie stokovej siete môže viesť aj k výskytu mestských povodní, ktoré predstavujú ďalší negatívny fenomén vysokej miery urbanizácie. Dochádza k nim pri radikálnych preťaženiach siete extrémnymi zrážkovými udalosťami [5].

Zmeny hydraulických podmienok v kanalizačných sieťach sa najčastejšie zisťujú pomocou modelov. Využívajú sa numerické modely simulujúce zrážkovo-odtokové pomery daného územia. Tieto modely demonštrujú zjednodušené systémy mestských povodí. Existuje niekoľko typov numerických modelov, ktoré sú schopné podrobne popísať a sledovať jednotlivé aspekty zrážkovo-odtokového procesu.

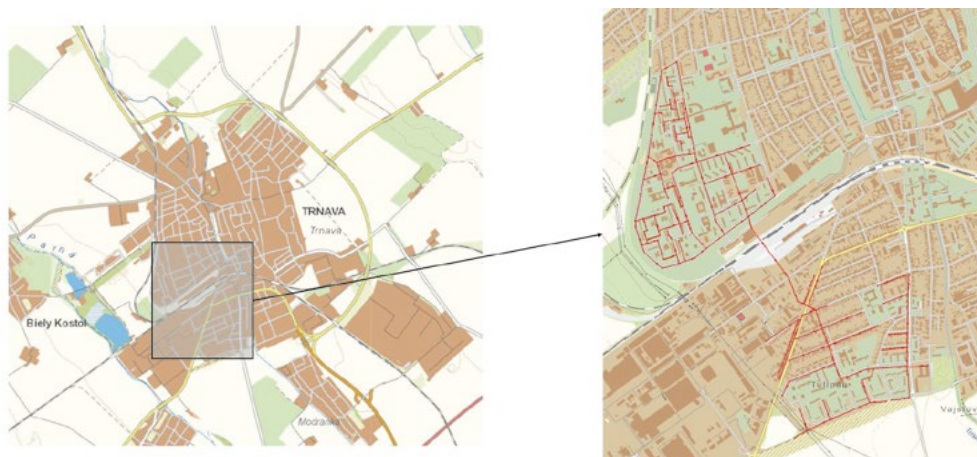
Matematické modely stokových sietí boli využité aj v prípadovej štúdií (Radinja M. a kol., 2019), kde sa posudzovali dopady opatrení na redukcii dažďového prítoku do siete. V prípadovej štúdií bolo vytvorených sedem rôznych zaťažovacích stavov rozdelených podľa použitých objektov na redukcii prítoku. K týmto objektom patrili dažďové nádrže a prírode blízke opatrenia (infiltračné objekty, zelené strechy a ich kombinácie) [6].

(Simperler L. a kol, 2020) označuje aplikáciu matematických modelov stokových sietí ako nástroj slúžiaci na výber vhodných lokalít pre objekty na zníženie dažďového prítoku do siete [7]. Podobne je možné simulovať aj hydraulické podmienky v stokových sieťach pri odľahčovaní odpadových vôd. Tieto modely pomáhajú pri vyselektovaní problémových častí siete [8].

3 METODIKA

Popis záujmového územia

Štúdia sa zaoberá vyselektovanou časťou mesta Trnava – šiestimi urbanistickými oblasťami, ktoré sa nachádzajú v dvoch mestských častiach (Trnava – Západ a Trnava – Juh). Počet obyvateľov v záujmovej oblasti sa pohybuje okolo 20 495 (k 31. 12. 2018) [9]. Celková dĺžka stokovej siete záujmovej oblasti je 3297,55 m. Obr.1 znázorňuje vyselektovanú časť záujmového územia a vedenie stokovej siete. Červené šípky znázorňujú smer prítoku odpadovej vody. Sieť posudzovaných stôk tvorí vetvovú sústavu a hlavným zberačom je stoka G. Z hlavného zberača sa potom ďalej odpájajú uličné stoky G1 – G9. Model posudzovanej siete končí v mieste odľahčovacej komory OK 01 G, ktorá ústí do rieky Trnávka. Splaškové vody sú ďalej odvádzané hlavným kanalizačným zberačom B do čistiarne odpadových vôd ČOV Trnava – Zeleneč. Priemery potrubí jednotlivých stôk sa pohybuje v rozmedzí od DN 300 na začiatku úsekov až po DN 2200 pri ústí do odľahčovacej komory.



Obr. 1 Záujmové územie.

Určenie okrajových podmienok – odtokový koeficient

Pri navrhovaní a posudzovaní stokových sietí hrá dôležitú úlohu správne definovanie okrajových podmienok. K týmto okrajovým podmienkam patrí aj odtokový koeficient, ktorý sa určuje ako podiel objemu maximálneho dažďového prietoku (Q_{max}), ktorý odtече za čas Δt z elementárnej plochy ΔS_s s rovnakou povrchovou úpravou a objemu zrážok spadnutých v tomto čase na elementárnu plochu ($q\Delta S_s \Delta t$) [3].

$$\psi = \frac{Q_{max} \cdot \Delta t}{q \Delta S_s \Delta t} \quad (1)$$

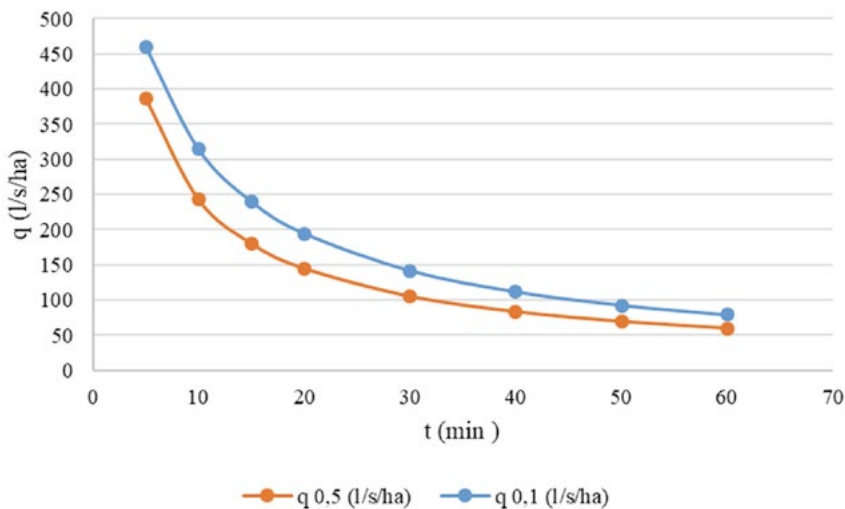
Pri racionálnej metóde výpočtu návrhového dažďového prietoku sa používa priemerný odtokový súčiniteľ. Definuje sa ako priemer čiastkových súčiniteľov odtoku a zodpovedajúcej povrchovej úprave v závislosti od spôsobu zastavania, druhu povrchu a sklonu povodia [2].

Pri hydraulickom posúdení je potrebné prehodnotiť pôvodne použité odtokové súčinitele. Pre väčšie územné celky sa vytvoria tzv. vzorové kanalizačné hektáre s priemerným súčiniteľom odtoku, ktoré zohľadňujú spôsob zástavby, povrchovú úpravu terénu a sklon povodia [3].

Určenie okrajových podmienok - návrhový dažď

Návrhový dažď sa definuje ako idealizovaný intenzitný profil dažďa, ktorý je charakterizovaný štatistickou periodicitou alebo dobou opakovania, trvaním, časovým a priestorovým rozložením dažďa [3]. Pri aktuálnom posúdení sa bude používať blokový dažď, ktorého použitie je charakteristické pre menšie urbanizované povodia.

Pre prvý zaťažovací stav (SCA) bol vybraný blokový dažď s trvaním 15 minút s periodicitou $p = 0,5$, ktorý predstavuje návrhový stav podľa STN EN 75 6101. Intenzita dažďa bola stanovená na základe vzťahov ktoré stanovili Šamaj a Valovič (1973) a pomocou rovnice na výpočet výdatnosti blokových dažďov publikovanou v roku 1979 Učíkánom a Horváthom [10]. Blokovaný dažď prvého zaťažovacieho stavu má intezitu $180,39 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$. Druhý zaťažovací stav je charakterizovaný 15 minútovým blokovým dažďom s periodicitou $p = 0,1$ a jeho intenzita je $240,1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$.

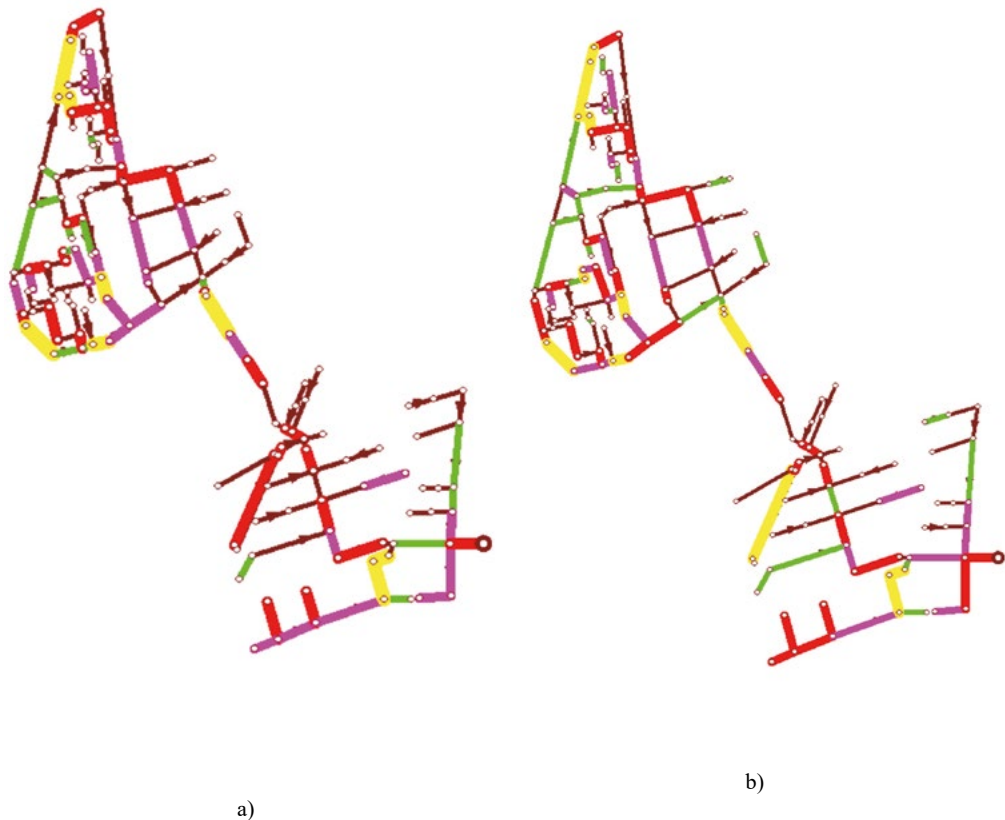


Obr. 2 Krivky blokových dažďov.

4 VÝSLEDKY

Posúdenie hydraulických podmienok kanalizačného zberača bolo vykonané pomocou programu SeWaCAD. Tento softwarový nástroj sa používa pri dimenzovaní a posudzovaní jednotnej alebo delenej stokovej siete. Bol vyvinutý na Katedre zdravotného a environmentálneho inžinierstva. Pracuje v súlade s normou STN EN 75 6101.

Po vytvorení modelu stokovej siete a implementácii okrajových podmienok prebehli simulácie zaťažovacích stavov. V zaťažovacom stave SCA bol daný zberač zaťažený blokovým dažďom s trvaním 15 minút, s periodicitou $p = 0,5$ a intenzitou $180,39 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$. V zaťažovacom stave SCB sa menila periodicitá zrážky na $p = 0,1$ a jeho intezita bola $240,1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$.



Obr. 3 Preťažené úseky stokovej siete a) SCA, b) SCB.

Obr. 3a prezentuje výsledky posúdenia v zaťažovacom stave SCA a Obr. 3b výsledky pre zaťažovací stav SCB. Znázorňuje jednotlivé preťažené úseky, ktoré sú farebne rozlíšené podľa percentuálneho podielu simulovaného prietoku a kapacitného prietoku existujúcej siete. Zelené úseky predstavujú stoky, ktoré sú preťažené na 100 – 150 %, ružové úseky sú preťažené na 150 – 250 %, červené na 250 - 500 % a žlté úseky predstavujú najviac preťažené stoky (>500 %). Hnedé úseky predstavujú nepreťažené - vyhovujúce úseky.

Tabuľka 1 prezentuje dĺžky preťažených úsekov pre jednotlivé zaťažovacie stavy a ich percentuálny podiel preťaženia. Pri posudzovaní na zaťažovací stav SCA je 1589,04 m siete preťažených a 1712,32 m vyhovuje podmienkam posúdenia. Výsledky zaťažovacieho stavu SCB ukazujú, že 1920 m siete je preťažených a 1381,02 m vyhovuje posúdeniu.

Tab. 1 Dĺžky preťažených úsekov.

Zaťažovací stav	Vyhovujúce úseky		Preťažené úseky		
	0 - 100 % (m)	100 - 150 % (m)	150 - 250 % (m)	250 - 500 % (m)	>500 % (m)
SCA	1712,32	329	565,04	503,63	191,37
SCB	1381,02	522,66	498,72	594,9	304,06

5 DISKUSIA

Celkový počet posudzovaných úsekov siete je 161. Simuláciou SCA sa zistilo, že pri návrhovom daždi podľa technickej normy 85 úsekov má vyhovujúce hydraulické podmienky. Hydraulická kapacita 76 úsekov je nevyhovujúca. Na 100 - 150 % je preťažených 16 úsekov. Preťaženie na 150 - 250% vykazuje 23 úsekov a na 250 - 500 % až 28 úsekov siete. Vyše 500 % preťaženie sa detekovalo na 9 úsekoch siete.

V prípade simulácie SCB nasledovná: 68 úsekov vyhovuje posúdeniu a 93 úsekov je preťažených. Pri tomto zaťažovacom stave je až 13 úsekov preťažených viac ako na 500%. Počet preťažených úsekov na 100 - 150 % je 25, na 150 - 250 % je 22, na 250 - 500 % je 33 úsekov.

(Hrudka a kol., 2020) sa vo svojej štúdii tiež zamerali na hodnotenie stavu stokových sietí pri zaťažení rôznymi dažďami. Hodnotila sa hydraulická kapacita siete pri dažďoch s periodicitou $p = 5$, $p = 0,5$ a $p = 0,2$. Záverom je konštatovanie, že je potrebné prehodnotiť možnosť rekonštrukcie a obnovy posudzovanej stokovej siete [11].

Na základe výsledkov simulácií (SCA a SCB) je možné tvrdiť, že vybraný kanalizačný zberač vykazuje neprípustné zmeny v hydraulických podmienkach už pri zaťažení SCA. V prípade zaťažovacieho stavu SCB je možné sledovať zhoršujúce sa podmienky pri zaťažení intenzívnejšou zrážkovou udalosťou.

6 ZÁVER

Cieľom príspevku bolo posúdiť hydraulické podmienky vybranej stokovej siete v meste Trnava. Je všeobecne známe, že toto mesto dlhodobou bojuje s nepriaznivými vplyvmi urbanizácie. K týmto nepriaznivým podmienkam patrí aj postupná urbanizácia územia, zvyšovanie zastavanosti a výskytu nepriepustných plôch. Tieto podmienky môžu spôsobiť výskyt mestských povodní, ktoré môžu ohroziť niekoľko súčastí mestskej infraštruktúry. V tejto štúdii sme predstavili metodiku posúdenia hydraulických podmienok stokových sietí pomocou softveru SeWaCAD.

Vytvoril sa matematický model stokovej siete pomocou, ktorého sa simulovali dva rôzne zaťažovacie stavy s rôznymi vlastnosťami zrážok. Zaťažovací stav SCA bol charakterizovaný ako východiskový prípad, keďže vlastnosti návrhového dažďa korešpondovali s návrhovým dažďom v norme STN EN 75 6101. Simulácia ukázala, že 51,9 % siete má vyhovujúce podmienky a 48,1 % siete je preťažená. Pri zaťažení dažďom s periodicitou $p = 0,1$ boli výsledky nasledovné: 41,9 % siete vyhovovalo posúdeniu a 58,1 % siete bolo preťažených.

Väčšina stokových sietí na Slovensku bola navrhnutá v súlade s koncepciou rýchleho odvedenia splaškových a dažďových vôd z urbanizovaných území. V súčasnosti sa naskytá otázka, či je táto koncepcia správna. Vplyvom klimatickej zmeny a antropogénnej činnosti sa naše mestá stávajú rizikovými mikroklimatickými oblasťami. Prehodnotením starej koncepcie odvádzania dažďových vôd a využitím nových prírode blízkych opatrení na redukcii prítoku dažďovej vody do siete je možné vrátiť do miest vodu a znížiť preťaženosť stokových sietí.

Podakovanie

Príspevok vznikol za podpory grantu „Mladý výskumník STU“ financovaných z centrálnych zdrojov rektorátu STU v Bratislave riešeného na Katedre zdravotného environmentálneho inžinierstva Stavebnej fakulty STU v Bratislave s akronymom IMPPAPOV. Táto práca bola tiež podporovaná Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVaŠ SR a SAV s označením 1/0727/20.

Použitie zdroje

- [1] GARCÍA, L., J. BARREIRO-GOMEZ, E. ESCOBAR, D. TÉLLEZ, N. QUIJANO a C. OCAMPO-MARTINEZ. Modeling and real-time control of urban drainage systems: A review. *Advances in Water Resources*. 2015, 85, 120-132. ISSN 03091708.
- [2] BUTLER, D., DAVIES, J. W.: *Urban Drainage*, ISBN 0-203-84905-1, Spon Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon 2011.
- [3] URCÍKÁN P., RUSNÁK D.: *Stokovanie a čistenie odpadových vôd: Stokovanie I. Navrhovanie stokových sietí*, ISBN 978-80-227-3435-6. Bratislava: STU v Bratislave, 2011.
- [4] PIRO P. CARBONE M., GAROFALO G., SANSALONE J. Size distribution of wet weather and dry weather particulate matter entrained in combined flows from urbanizing sewershed. *Water, Air Soil Pollut.* 2010. 206 (14), 83 – 94.
- [5] GAROFALO G., GIORDANO A., PIRO P., SPEZZANO G. A distribution real-time approach for

- mitigating CSO and flooding in urban drainage systems. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017. 78, 30 – 42.
- [6] RADINJA M., COMAS J., COROMINAS L., ATANASOVA N. Assessing stormwater control measures using modelling and multi-criteria approach. *J. Environ. Manag.* 2019. 243, 257 – 268.
- [7] SIMPERLER L., HIMMELBAUER P., STOEGLHNER G. Prioritization of stormwater management sites in urban areas. *J. Environ. Manag.* 2020. 265, 110507.
- [8] PIRO P. CARBONE M., GAROFALO G., SANSALONE J. Size distribution of wet weather and dry weather particulate matter entrained in combined flows from urbanizing sewershed. *Water. Air Soil Pollut.* 2010. 206 (14), 83 – 94.
- [9] Poloha mesta [online]. [cit. 2020-11-06]. Dostupné z: <https://www.trnava.sk/sk/clanok/poloha>
- [10] RUSNÁK D., STANKO Š., ŠKULTÉTYOVÁ I. Rain model - boundary condition in sewer network appraisal. *Pollack Periodica*. 2016. Vol. 11, No. 2, 105–112.
- [11] HRUDKA, J., CSICSAIOVÁ, R., MARKO, I., STANKO, Š., ŠKULTÉTYOVÁ, I. The impact of intense rainfall on a storm sewage system of the east part of Trnava city. In *Advances in Environmental Engineering (AEE2019)* [elektronický zdroj] : proceedings. November 25-27, 2019, Ostrava, Czech Republic. 1. vyd. Bristol : IOP Publishing, 2020, online, [5] s., art. no. 012022. ISSN 1755-1307.

CHARAKTERISTIKA ODPADNÍCH VOD VZNIKLÝCH PŘI ČIŠTĚNÍ SILNIČNÍCH TUNELŮ

CHARACTERISTICS OF WASTEWATER FROM ROAD TUNNELS WASHING

Ivo Korytář¹, Kristýna Velikovská¹

¹ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Centrum AdMaS, Purkyňova 651/139, 612 00 Brno

Abstrakt

V silničních tunelech v hustě urbanizovaných oblastech dochází při vysoké hustotě provozu k zanášení povrchu vozovky, stěn ale také tunelového vybavení, což může negativně ovlivňovat bezpečnost. Z těchto důvodů jsou silniční tunely pravidelně čištěny. Znečišťující látky ulpělé na povrchu jsou při čištění odplavovány spolu se vzniklou odpadní vodou, se kterou je nakládáno v jednotlivých zemích Evropské Unie odlišnými způsoby. Tento příspěvek popisuje postup aktuálně probíhajících projektů zabývajících se odpadní vodou vzniklou při čištění silničních tunelů a využitím biocharu při čištění odpadních vod.

Klíčová slova

Silniční tunel, čištění silničních tunelů, odpadní voda, biochar

Abstract

Road and highway tunnels especially in densely urbanized areas are clogged during car traffic. Clogged road surfaces, walls, and tunnel equipment can negatively impact safety. For these reasons, road tunnels are regularly washed. Pollutants adhering to the surface are washed away during cleaning together with the generated wastewater, which is treated in different ways in individual countries of the European Union. This paper describes the progress of ongoing projects dealing with wastewater generated during road tunnel washing and the use of biochar in wastewater treatment.

Key words

Road tunnel, tunnel washing, wastewater, biochar

1 ÚVOD

V silničních tunelech dochází při vysoké hustotě provozu k zanášení povrchu vozovky, stěn ale také tunelového vybavení. S ohledem na délku tunelu, hustotu silničního provozu a technologickou úroveň a nastavení tunelového vybavení, je pro každý silniční tunel vytvořen provozní řád, kde je mimo jiné specifikována četnost a technologické postupy pro čištění každého tunelu.

Četnost opakování čistících procesů se pohybuje v rozmezí 2-12krát za rok a objem použité vody se pohybuje v rozmezí 30-150 l na běžný metr délky tunelu. Čištění obvykle probíhá otryskáním povrchů tlakovou vodou s nebo bez přidaných detergentů, množství použitého detergentu se obvykle pohybuje v rozmezí 0,5-1 %. Tlak se pohybuje v rozmezí od 6 do 160 barů v závislosti na konkrétním čištěném povrchu. Nejčastějším způsobem nakládání s těmito odpadními vodami (OV) je vypouštění do stokové sítě nebo přímo do recipientu, u novějších tunelů bývá předřazena sedimentační nádrž [1], [2], [3].

V České republice je v současnosti v provozu 29 silničních a dálničních tunelů o celkové délce 43,5 km [4]. OV vzniklá při jejich pravidelném čištění odtéká do stokové sítě nebo přímo do recipientu. Pouze v tunelech vybudovaných v posledních letech a nově projektovaných stavbách je předřazena sedimentační nádrž, ze které je OV nejčastěji odváděna do stokové sítě, vypouštěna do recipientu nebo přepravována na průmyslové čistírny odpadních vod.

V Evropské unii je vypouštění těchto OV do recipientu bez předchozí úpravy zakázáno pouze v Rakousku a ve Švýcarsku. V těchto zemích je před vypouštěním do stokové sítě předřazena sedimentační nádrž. Při vypouštění do recipientu je po sedimentaci OV přiváděna na pískové filtry a přes vrstvu aktivního uhlí. Využívanou technologií je také flokulace. Především v Rakousku se využívá mobilních jednotek určených

k čištění těchto OV. Výhodou je, že mobilní jednotka je přivezena pouze během čištění silničních tunelů a lze ji tedy využívat průběžně ve více lokalitách [5].

V současné době probíhá v laboratorních podmínkách na AdMaS VUT v Brně testování účinnosti odstranění vybraných znečišťujících látek obsažených v OV vzniklé při čištění silničních tunelů. Účinnost čištění je stanovována pro biochar, který byl vyroben prostřednictvím středně-teplotní pyrolyzy z různých organických odpadů, např. gastro odpadu nebo z čistírenských kalů. Účinnost čištění prostřednictvím biocharu je porovnáváno s konvenčním adsorbentem – granulovaným aktivním uhlím (dále GAU). V současné době probíhají odrazové sklenicové pokusy. Zdrojem OV je voda zachycená po čištění silničního tunelu v Brně. Čištění tohoto tunelu probíhá 2krát ročně, vždy na jaře a na podzim.

Cílem testování je stanovení vhodné doby kontaktu, množství a frakce dávkovaného adsorbentu a ověření účinnosti biocharu pro odstranění vybraných znečišťujících látek vyskytujících se v OV vniklé při čištění silničních tunelů. Výsledky účinnosti biocharu budou porovnány s konvenčním GAU.

Předmětem tohoto příspěvku je představení případových studií zaměřených na zkoumání složení těchto OV a probíhajících postupů při řešení projektu.

2 PŘÍKLADY VÝZKUMNÝCH STUDIÍ ZABÝVAJÍCÍCH SE OV POCHÁZEJÍCÍ Z ČIŠTĚNÍ SILNIČNÍCH A DÁLNIČNÍCH TUNELŮ

Mimo technické řešení a způsob provozování silničních a dálničních tunelů ovlivňuje složení OV vzniklých při jejich čištění také zvolená čistící metoda, tedy zda je čištění prováděno pouze tlakovou vodou, anebo jsou také použity přidané čistící prostředky. V následující stati jsou uvedeny příklady studií zaměřených na zkoumání složení těchto OV.

Studie Petersen, 2016 [3]

V rámci studie byly zkoumány OV ze tří silničních tunelů v Norsku a jejich vliv na organismy. Odebrané vzorky byly zmrazeny do 4 hodin od odebrání a byla provedena chemická analýza, naměřené výsledky viz Tab. 2

Tab. 1 Základní technický popis posuzovaných tunelů [3].

Tunel	Nordby 1	Nordby 2	Granfoss	Oslofjord
Délka [km]	3,8	3,8	1,0	7,3
Průměrný denní počet vozidel	32 600	32 600	30 800	6827
Čištění	Sedimentace	Sedimentace	Bez	Bez

Tab. 2 Vybrané parametry a koncentrace těžkých kovů v OV, 1 bodový vzorek [3].

	Nordby 1	Nordby 2	Granfoss	Oslofjord
pH	7,42	7,59	7,55	7,88
Zákal (FNU)	1769	1420	2706	8,77
NL (mg·l ⁻¹)	1510	2180	1850	20,3
Chemické prvky (μg·l ⁻¹)				
Al	36100	<30	38100	<30
As	4,7	<0,25	13	<1
B	110	110	103	780
Ba	313	130	553	10
Be	1,3	<0,05	1,8	<0,2
Ca	72700	61000	110000	234000
Cd	0,41	0,22	1,01	0,1
Co	33,5	0,88	43,4	0,2
Cr	133	5,6	110	<2
Cu	316	27,2	448	7,5

Fe	67000	0,04	62000	120
K	23000	21000	22200	68200
Mg	25500	9700	43400	286000
Mn	1050	348	2350	<0,4
Mo	36	7,9	68	6,9
Na	322000	1480000	117000	2220000
Ni	70,1	4,9	103	<1
P	2580	<200	2380	<200
Pb	37,4	0,05	66,5	0,1
S	18700	25000	38100	208000
Sb	27	5,9	28	<1
Si	34500	4140	36300	6070
Sn	37	<0,5	48	<2
Sr	251	1220	3610	
Ti	5,07	<2	6940	8,3
U	3,8	0,94	5,36	21,3
V	112	3,84	158	<0,2
Zn	3290	501	2300	9

Studie Meland, 2010 [6]

Studie zkoumala OV vzniklé při čištění silničního tunelu délky 3,84 km nedaleko Osla. Tunel je složen ze dvou tubusů, každý se dvěma jízdními pruhy. Průměrný denní počet vozidel je 25 000 s průměrnou rychlostí 89 km/hod.

V tabulce uvedené níže jsou porovnány naměřené hodnoty z recipientu, do kterého jsou OV po předčištění vypouštěny, na odtoku po sedimentaci a na přítoku do sedimentační nádrže.

Tab. 3 Vybrané parametry a koncentrace těžkých kovů v OV. Odebrané vzorky z recipientu a z odtoku ze sedimentační nádrže byly 1 bodové, vzorek před sedimentací byl slévavý 4 bodový [6].

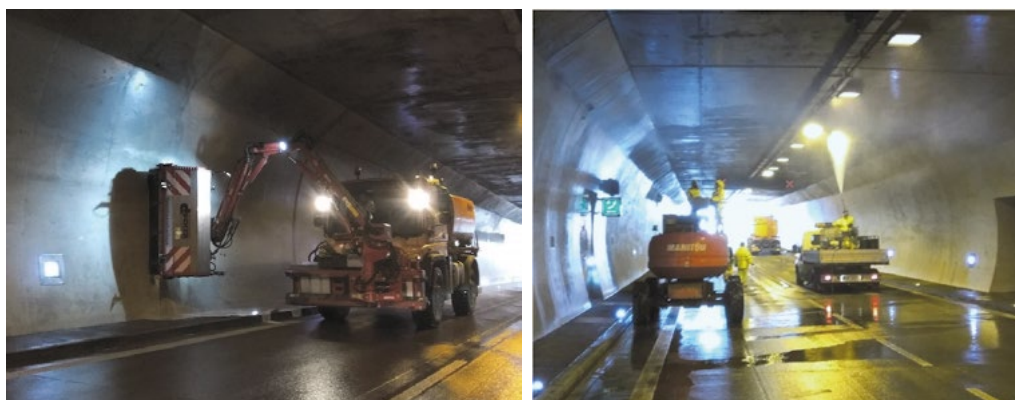
Měřená veličina	Jednotky	Recipient	Hodnoty po sedimentaci	Hodnoty před sedimentací			
				Průměrná hodnota	Směr. odchylka	Min.	Max.
pH	-	7,0	7,5	-	-	-	-
Vodivost	$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (20°C)	22,8	66,1	-	-	-	-
Teplota	°C	-	3,1	-	-	-	-
Tvrdost	$\text{Mg CaCO}_3\cdot\text{l}^{-1}$	72	105	160	3	154	165
TOC	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	6,7	3,1	10,6	0,1	10,3	10,8
TOC LMM	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	4,2	2,3	11,4	0,8	9,8	13,3
Ca	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	20,7	35,4	47	0,5	46	48
K	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	3,8	3,3	12,6	0,4	11,7	13,3
Mg	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	4,9	4,0	10,3	0,4	9,4	11,4
Mn	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	0,04	0,02	0,18	0,01	0,15	0,21
Na	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	13,5	86,3	645	21	592	692
Si	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	4,3	2,5	7,5	0,6	6,5	9,0
Chloridy	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	23,6	98,6	788	18	736	820
Sírany	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	13,3	41,4	59,6	0,7	58,1	61,4
Dusičnany	$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	3,2	0,9	2,3	0,4	1,9	3,4

3 ČIŠTĚNÍ SILNIČNÍCH TUNELŮ A ODBĚR OV

Čištění brněnských, silničních tunelů ve správě Ředitelství silnic a dálnic ČR (dále ŘSD) probíhá 2krát ročně, vždy na jaře a na podzim. Čištění tlakovou vodou s přidaným detergentem, se používá k čištění vozovky, chodníku stropu a také tunelového vybavení. Kombinace mechanického čištění kartáči a tlakové vody se využívá pouze při čištění ostění.

Celková délka silničních tunelů v Brně je 4.991 m a celková spotřeba vody během jednoho čištění je 790 m^3 , tedy na 1 km tunelu, včetně stropu, ostění, chodníku, vozovky a veškerého vybavení, je v průměru použito $158,3 \text{ l}$ vody.

Při čištění proudí OV přes uliční vpusti do sedimentační nádrže, ze které bylo pro účely testování odčerpáno cca 600 l do připravené IBC nádrže. V současné době probíhají odrazové sklenicové pokusy potřebné ke stanovení množství dávkovaného adsorbentu a také vhodné doby kontaktu. Poté budou sklenicové pokusy rozšířeny o další druhy biocharu při stanovené době kontaktu a množství dávkovaného adsorbentu. Na závěr bude vybrán vhodný biochar pro otestování na koloně. Při testování na koloně bude optimalizován průtok OV v závislosti na mocnosti pískového filtračního lože a adsorbentu biocharu.



Obr. 1 Vlevo probíhající čištění ostění tunelu mechanickým kartáčem s tlakovou vodou, vpravo čištění stropu tunelu tlakovou vodou [7].

4 ODRAZOVÉ SKLENICOVÉ POKUSY

Na základě konzultace se zástupci Fakulty chemické (dále FCH) byl stanoven minimální objem OV pro domluvené rozbory 2 l. Sledované znečišťující látky jsou nerozpuštěné látky, nepolární extrahovatelné látky, polyaromatické uhlovodíky, uhlovodíky C10-C40, chloridy, sírany a těžké kovy.

Pro odrazové sklenicové pokusy je jako adsorbent vybrán biochar z gastro odpadu, aktivovaný biochar z gastro odpadu a GAU. Množství použitého adsorbentu je stanoveno $2,5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ a $5,0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. Míchání probíhá v tmavých, půllitrových lahvích na míchacím přístroji. OV s přidaným adsorbentem je po dobu míchání umístěna v chladicím zařízení při konstantní teplotě $20,5\text{-}23,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Vzorčky jsou odebrány postupně s kontaktní dobou míchání 0 – 7 – 24 – 46 hod.

Po uplynutí stanovené doby kontaktu OV s vybraným adsorbentem je obsah lahve přefiltrován přes filtrační papír a je stanoveno pH [-], teplota [$^\circ\text{C}$], redox potenciál U [mV], salinita [-], konduktivita [$\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$] a specifický odpor [$\Omega \cdot \text{cm}$]. Pro analýzu těchto ukazatelů je využíván laboratorní měřič (Obr. 1) umístěný v laboratoři AdMaS centra.



Obr. 2 Analýza ukazatelů v laboratoři AdMaS VUT v Brně [7].

5 ZÁVĚR

Na základě dostupných studií i vlastního měření je zřejmé, že tyto OV mají zvýšené koncentrace těžkých kovů a s ohledem na používání posypových solí zvýšenou koncentrací sodíku a také chloridů. Vypouštění těchto OV bez předčištění není vhodné. V případě vypouštění do stokové sítě je zde riziko porušení kanalizačního řádu a při vypouštění do recipientu studie upozorňují na riziko negativního ovlivnění organismů žijících v recipientu.

V některých zemích EU, především tedy v Rakousku a Švýcarsku, je vypouštění OV vzniklé při čištění silničních a dálničních tunelů bez jejich předchozího čištění zakázáno. Ve skandinávských zemích se touto problematikou v posledních letech intenzivně zabývají. Nově budované tunely jsou navrženy včetně systému čištění s touto OV. Lze tedy předpokládat, že v blízké budoucnosti dojde ke zpřísnění legislativy, z pohledu sledovaných parametrů při čištění vozovek a silničních tunelů, v celé EU. Toto zpřísnění legislativy bude mít za následek zapojení dalšího stupně čištění OV, který by dokázal účinně a efektivně toto znečištění odstranit. Lze předpokládat doplnění technologie sedimentace o moderní fyzikální membránové technologie nebo zvolit ekonomičtější technologické řešení spočívající ve filtraci a adsorpci.

GAU s vysokých specifickým povrchem se úspěšně používá při čištění OV. Alternativním a zejména levnějším řešením by bylo použití biocharu, tedy pevného uhlíkatého produktu po pyrolyze organického materiálu. Jako vhodný zdroj organického materiálu pro přípravu biocharu je možné použít organický odpad, zejména agromasu, ale také gastro odpad.

Vzhledem k různým vlastnostem biocharu, v závislosti na typu zpracovávaného organického materiálu a technologii zpracování, bude cílem budoucího měření stanovení vhodného organického materiálu pro výrobu biocharu a otestování filtrační účinnosti a životnosti biocharu a porovnání těchto hodnot s klasickým GAU.

Príspevek predstavil probíhající testování účinnosti biocharu při odstraňování vybraných znečišťujících látek z OV vzniklé při čištění silničních tunelů, které probíhá ve výzkumném centru AdMaS Vysokého učení technického v Brně.

Poděkování

Za spolupráci a možnost publikování naměřených hodnot z odběru odpadní vody vzniklé při čištění silničních tunelů děkujeme Ředitelství silnic a dálnic ČR.

Tento článek byl vytvořen s finanční podporou TA ČR v rámci řešení projektu č. TJ02000262 „Zpracování gastro odpadu do podoby pevného uhlíkatého produktu k materiálovému využití“ a finanční podporou Vysokého učení technického v Brně v rámci řešení juniorského projektu FAST-J-20-6431 „Aktuální problémy vodního hospodářství obcí“.

Použité zdroje

[1] HALLBERG, M., G. RENMAN, L. BYMAN, G. SVENSTAM a M. NORLING. Treatment of tunnel

- wash water and implications for its disposal. In: *Water Science and Technology*. 2014, 69(10), s. 2029-2035. DOI: 10.2166/wst.2014.113. ISSN 0273-1223. Dostupné také z: <https://iwaponline.com/wst/article/69/10/2029/17444/Treatment-of-tunnel-wash-water-and-implications>
- [2] STOTZ, G. a Ch. HOLLDOEB. Highway tunnel washing and its effect on water quality. In: 11th International Conference on Urban Drainage. Edinburgh, Scotland, UK, 2008, s. 9. Dostupné také z: <https://semanticscholar.org/paper/Highway-tunnel-washing-and-its-effect-on-water-Stotz/1462330f84de1977db1d4c1b8620ca4042491d8e>
- [3] PETERSEN, Karina, Kine BÆK, Merete GRUNG, Sondre MELAND a Sissel Brit RANNEKLEV. In vivo and in vitro effects of tunnel wash water and traffic related contaminants on aquatic organisms. In: *Chemosphere*. 2016, 164, s. 363-371. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.08.108. ISSN 00456535. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653516311432>
- [4] Dalnice-Silnice.cz: Tunely v České republice [Online]. Retrieved January 21, 2020, from <http://www.dalnice-silnice.cz/tunel.htm> (2019)
- [5] CEDR. Management of contaminated runoff water: current practice and future research needs. SBN: 979-10-93321-18-9 (2016)
- [6] MELAND, Sondre, Reidar BORGSTRØM, Lene Sørli HEIER, Bjørn Olav ROSSELAND, Oddvar LINDHOLM a Brit SALBU. Chemical and ecological effects of contaminated tunnel wash water runoff to a small Norwegian stream. In: *Science of The Total Environment*. 2010, 408(19), s. 4107-4117. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.05.034. ISSN 00489697. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969710005498>
- [7] KORYTÁŘ, I.; MRAVCOVÁ, L.; RAČEK, J.; VELIKOVSKÁ, K.; MACSEK, T.; ÚTERSÝ, M.; HLAVÍNEK, P. Využití biocharu pro čištění odpadních vod z tunelů. *MĚSTSKÉ VODY 2020*. Brno: ARDEC, s.r.o., 2020. s. 110-115. ISBN: 978-80-86020-91-4.

KVALITA ODPADNÍ VODY V ZÁVISLOSTI NA MNOŽSTVÍ KYSLÍKU

WASTEWATER QUALITY DEPENDING ON OXYGEN AMOUNT

Veronika Singrová^{*,1}

*singrova.v@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí, Žižkova 17, 602 00 Brno

Abstrakt

Cílem článku je popis hlavních ukazatelů, které ovlivňují množství kyslíku v odpadní vodě a tím její celkovou kvalitu. Existují tři prostředí, která charakterizují odpadní vodu z hlediska množství kyslíku. Po využití veškerého kyslíku z odpadní vody často dochází k negativním jevům. Jedná se například o porušení cementové části stok, vznik nadměrného zápachu v okolí nebo je negativně ovlivněno samotné čištění odpadních vod. V článku se objevují i naměřené hodnoty oxidačně-redukčního potenciálu v reálné čerpací stanici na jednotné stokové síti.

Klíčová slova

Kvalita odpadní vody, kyslík, oxidačně-redukční potenciál

Abstract

The aim of the article is to describe the main indicators that affect the amount of oxygen in wastewater and its overall quality. There are three environments that characterize wastewater according to the amount of oxygen. After using all the oxygen from the wastewater, negative phenomena often occur. For example, damage to the cement part of sewers, the formation of excessive odors in the environment or the negative impact of wastewater treatment. The article also includes measured values of the oxidation-reduction potential in a real pumping station in a combined sewer.

Key words

Wastewater quality, oxygen, redox potential

1 ÚVOD

Kvalitu odpadní vody ovlivňuje velké množství faktorů. Zásadní je samozřejmě charakter odpadní vody, který souvisí s místem jejího vzniku. Další důležitý faktor představuje samotná stoková síť a příslušné objekty, a to hned z několika hledisek, dále pak teplota okolního prostředí, doba zdržení odpadní vody v kanalizaci a další.

Je-li kvalita odpadní vody špatná, pak negativně ovlivňuje stokovou síť, kanalizační objekty i čištění odpadních vod na čistírnách. Tento článek je zaměřen především na množství kyslíku v odpadní vodě, který právě úzce souvisí s její kvalitou. Oxidačně-redukční potenciál (ORP) je veličina, která charakterizuje kvalitu vody právě z hlediska množství kyslíku.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

V této kapitole je shrnuta teoretická část související s problematikou vlivu kyslíku na kvalitu odpadní vody.

Oxidačně-redukční reakce

Redoxní reakce (oxidačně-redukční) souvisí s oxidací a redukcí částic pomocí přenosu elektronů a jejich průběh je na sobě závislý. Není možné, aby probíhala jedna reakce bez druhé, a proto je redoxní systém charakterizován látkou v oxidované a redukované formě. Oxidovaná látka předává určité množství elektronů, které redukovaná látka musí přijmout [1].

Tyto reakce jsou nedílnou součástí čistírenských procesů, protože právě díky nim dochází k rozkladu organické hmoty. O směru oxidačně-redukčních reakcí rozhoduje afinita (přitažlivost) látky k elektronům. Lze ji popsat i pomocí oxidačně-redukčního potenciálu (ORP) [2].

Oxidačně-redukční potenciál (ORP)

Oxidačně redukční potenciál je elektrický potenciál vytvořený na platinové elektrodě, která je ponořená do roztoku s látkou v oxidovaném i redukovaném stavu. Jednotka tohoto potenciálu je Volt, respektive mV [2].

Oxidačně-redukční potenciál je důležitou veličinou, která má vliv na chemické i biochemické procesy ve vodách. Oxidačně-redukční potenciál vod se pohybuje v rozmezí -500 mV až +500 mV. Ideální hodnota ORP pro čištění odpadních vod je okolo 400 mV [3].

Tento potenciál je měřený pomocí ORP sond. Na trhu se jich vyskytuje velké množství. Většinou měří více veličin, kromě oxidačně-redukčního potenciálu i pH vody, koncentraci rozpuštěného kyslíku nebo teplotu.



Obr. 1 Měřicí ORP sonda.

Typy prostředí dle množství kyslíku

Mikroorganismy potřebují biogenní prvky a energii pro samotný růst. Pro zajištění čistírenských procesů je zapotřebí vhodné prostředí, které se u jednotlivých fází čištění odpadních vod liší. Podle koncentrace rozpuštěného kyslíku v odpadních vodách lze toto prostředí charakterizovat a pojmenovat.

Prostředí, ve kterém je přítomný molekulární kyslík, se nazývá oxické nebo aerobní. Kyslík se zde stává konečným příjemcem elektronů. Při těchto podmínkách probíhá oxidace a na čistírnách odpadních vod je to charakteristické prostředí pro nitrifikaci [2]. ORP v tomto případě nabývá kladných hodnot [3].

Pokud je kyslík přítomen pouze ve formě vázané, pak se jedná o prostředí anoxické. Takové prostředí zajišťují sloučeniny dusíku. Konečným akceptorem elektronu je dusitanový a dusičnanový dusík. Tyto podmínky jsou charakteristické pro denitrifikaci [2]. ORP se pohybuje od 150 mV po 250 mV. Ve starší literatuře se mnohdy uváděly hodnoty od -50 mV po 50 mV, ty však byly vztaženy k chloridostříbrné elektrodě [3].

Anaerobní prostředí je pak takové, kde se kyslík nevyskytuje v molekulární formě, ani ve formě NO^3 - nebo NO^2 - [1]. Elektrony jsou akceptovány organickou látkou, která je z části oxidována a z části redukována [2]. Hodnoty ORP se v anaerobních podmínkách pohybují v záporných číslech, většinou kolem -300 mV. Toto prostředí je vhodné pro vznik sulfanu [3].

Podle hodnot oxidačně-redukčního potenciálu uvedených v Tab. 1 lze tato prostředí také rozdělit. Hodnoty v Tab. 1 jsou v přepočtu ke standardnímu potenciálu vodíkové elektrody.

Tab. 1 Typy prostředí dle ORP [1].

Oxidačně-redukční potenciál	Prostředí	Převažující reakce
> 250 mV	Aerobní/oxické	Oxidační
150 mV – 250 mV	Anoxické	Oxidační
< 150 mV	Anaerobní	Redukční

Faktor 1: Stav kanalizačního systému

Další faktor ovlivňující kvalitu odpadní vody je samotný návrh kanalizačního systému a jeho celková délka. Správný návrh by měl zajistit rychlé a bezpečné odvedení odpadních vod z domácností a průmyslových podniků. Vlivem stárí, nedodržených postupů při výstavbě nebo působením okolního prostředí (například ořesy od vozidel, prorůstání kořenů stromů apod.) může docházet k poškození kanalizačních systémů. To způsobuje snížení průtočnosti profilu stoky, infiltraci odpadní vody do půdního prostředí, tvorbu sedimentů a překážek. Sedimenty pak často zahňávají, vznikají anaerobní podmínky a tím i další zdroj zápachu.

Faktor 2: Charakter odpadní vody

V každém kanalizačním rádu i v NV č. 401/2015 Sb. jsou uvedeny látky a jejich koncentrace, které není možné do kanalizace vypouštět. Dodržování těchto dokumentů je pak věc druhá. Průmyslové podniky je musí také respektovat a v případě nutnosti odpadní vodu před vypouštěním do kanalizace předčistit.

Z Tab. 2 je patrné, že na kvalitě odpadní vody se podílí i způsob jejího odvádění. Gravitační kanalizace je z hlediska negativního vlivu na vypouštěné odpadní vody nejpříznivější. Pokud se v rámci kanalizačního systému objevují čerpací stanice, pak představují možný zdroj zhoršení kvality vody.

Alternativní způsoby odkanalizování zapříčiňují horší kvalitu odpadní vody, což dokazují vyšší hodnoty koncentrací všech základních ukazatelů znečištění (také Tab. 2). Kvůli delší době zdržení a vyššímu počtu čerpacích stanic je pro vznik anaerobních podmínek více náchylná především tlaková kanalizace.

Tab. 2 Kvalita odpadní vody (medián hodnot) pro různé systémy odkanalizování [4].

Systém odkanalizování	BSK ₅ [mg·l ⁻¹]	CHSK _{Cr} [mg·l ⁻¹]	NL [mg·l ⁻¹]	Nc [mg·l ⁻¹]	NH ₄ ⁺ [mg·l ⁻¹]	Pc [mg·l ⁻¹]	pH [-]
Jednotná kanalizace	199,6	471,4	232,6	65,4	38,5	7,1	7,7
Splašková kanalizace	524,5	1031,5	446,3	112,1	93,5	13,0	7,8
Tlaková kanalizace	787,5	1592,1	863,5	188,7	133,7	18,5	8,2

Faktor 3 a 4: Teplota a pH

Zákon č.254/2001 Sb. považuje za odpadní vodu takovou, u které došlo ke změně vlastností ve složení, ale i teplotě. Především vyšší teplota odpadní vody (například vypouštěné chladicí vody apod.) je schopna zapříčinit vznik dalších nežádoucích reakcí a procesů. Hodnota rozpuštěného kyslíku s rostoucí teplotou klesá, což je patrné z následující Tab. 3. Zároveň dochází ke zvýšené spotřebě kyslíku pro biologické procesy a tím je podpořen vznik anaerobního prostředí.

Tab. 3 Závislost rozpustnosti kyslíku na teplotě [5].

Teplota [°C]	Rozpustnost [mg·l ⁻¹]
0	14,6
6	12,5
12	10,8
18	9,5
24	8,4

S teplotou odpadní vody souvisí i pH a množství a druhy bakterií a mikroorganismů. Odpadní vody běžné kvality vykazují mírně alkalické pH (7-8) [5]. Většina chemických, fyzikálně-chemických a biologických procesů je touto hodnotou ovlivněna.

Faktor 5: Doba zdržení

Velký vliv na kvalitu odpadní vody a množství kyslíku v ní má především doba zdržení v kanalizačním systému. To souvisí s celkovou délkou kanalizace a s kanalizačními objekty. Zdrojem těchto problémů jsou často čerpací stanice, ve kterých dochází k akumulaci odpadní vody.

Ideální doba zdržení v ČS je do 2 hodin. Při delším zdržení je zapotřebí brát v potaz další okolní vlivy a objekt kontrolovat. Dle normy ČSN EN 16932-1 by doba zdržení neměla být delší než 8 hodin. Pokud se odpadní voda zdržuje v objektech déle, pak je zapotřebí navrhnout speciální opatření [6]. Pro zlepšení nebo udržení kvality odpadní vody je důležité správné nastavení spínání čerpadla.

Důsledky anaerobního prostředí

Anaerobní prostředí má za následek vznik sulfanové koroze cementových materiálů, vznik nadměrného zápachu a znesnadňuje čištění odpadních vod na čistírnách. Tyto problémy často souvisí s vyššími teplotami během léta, ztěžují provozování stoky a zkracují životnost materiálů. Při poškození kanalizačního systému je pak nutná častější obnova stoky. Níže jsou popsány dva hlavní důsledky anaerobních podmínek, které souvisí se stokovou sítí.

Biogenní síranová koroze

V odpadních vodách, které vykazují značně záporné ORP, může docházet k oxidaci sloučenin síry na sírany a redukčními reakcemi pak vzniká sulfan. Ten poškozuje vlhká, ale nezatopená místa potrubí, šachet a dalších objektů s cementovým pojivem. Sulfidická síra je pomocí bakterií oxidována až na kyselinu sírovou. Tím dochází ke značnému snížení pH a poškození konstrukcí [3]. Na následujícím Obr. 2 je viditelné značné poškození touto korozí na pouze 10 let starých šachtách, do kterých je zaústěna tlaková kanalizace (předávací šachty).



Obr. 2 Ukázka koroze betonového zdiva.

Zápach

Nedostatek kyslíku v odpadních vodách způsobuje značný zápach na stokové síti, což může být mnohdy nepříjemnou záležitostí pro samotné obyvatele. Vlivem různých reakcí vznikají v kanalizaci nežádoucí plyny, jejichž druh a množství je ovlivněno mnoha faktory. Nejznámější z nich je již zmíněný sirovodík, který má charakteristický pach po zkažených vejcích.

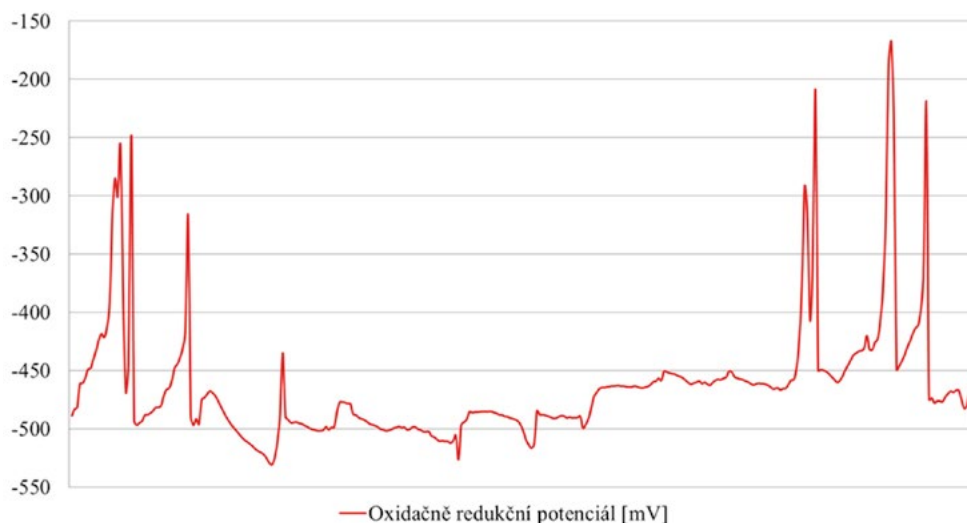
Vnímání zápachu je velmi individuální. U kanalizací se ze zápachem pojí právě sulfan. Jeho koncentrace se při měření udává v jednotkách ppm (parts per million). Vyhláška č. 415/2012 Sb. udává přepočtený. Konkrétně 10 mg m^{-3} by mělo odpovídat 7,1 ppm [7].

3 METODIKA

Bylo provedeno měření oxidačně-redukčního potenciálu v čerpací stanici na konci obce, která nemá svou vlastní čistírnu odpadních vod. V obci žije asi 4 000 obyvatel, jsou tam dva průmyslové podniky a kanalizace je jednotná. Sonda byla nainstalována za mechanické předčištění na nátok do čerpací stanice. Měření probíhalo na konci měsíce srpna (celkem 8 dní), kdy se teploty vzduchu pohybovaly i nad 30 °C. Při měření byla použita sonda HQ40D od firmy Hach [8].

4 VÝSLEDKY

V Obr. 4 je zpracovaný graf z výše popsaného měření. V grafu je zobrazen záznam z ORP sondy umístěné na přítoku do ČS v průběhu osmi srpnových dnů.



Obr. 3 Průběh oxidačně-redukčního potenciálu za 8 dní.

V Tab. 4 jsou číselně shrnuty naměřené hodnoty veličin ORP a teploty. Je zde uvedena průměrná hodnota oxidačně-redukčního potenciálu i teploty, medián ORP i teploty a maximální i minimální záporná hodnota ORP a k ní příslušná teplota odpadní vody (naměřená ve stejném okamžiku).

Tab. 4 Číselné shrnutí měření ORP a teploty.

Popis	ORP [mV]	T [°C]
Průměrná hodnota	-464,4	19,7
Medián	-473,3	19,8
Nejméně záporná hodnota	-167,4	20,4
Nejvíce záporná hodnota	-530,7	20,4

5 DISKUZE

Průměrné a extrémní hodnoty jsou více specifikovány v Tab. 4. Za 8 dní měření se ani jednou nedostala hodnota ORP do kladné oblasti. Nejvíce se přiblížila zápornou hodnotou -167,4 mV. Nejvíce záporná hodnota pak dosáhla -530,7 mV. Z naměřených hodnot je patrné, že odpadní voda je již na přítoku do ČS anaerobní a není v ní tedy přítomen žádný kyslík. Způsobuje to především odkanalizování rozsáhlé oblasti, částečné odkanalizování města tlakovou kanalizací, čerpací stanice na stoce a špatný stav kanalizační sítě.

Předcházení vzniku anaerobních odpadních vod a možná řešení

Při správném návrhu a výstavbě kanalizace a souvisejících objektů by odpadní voda neměla být anaerobní. Důležitý je také řádný provoz a pravidelná kontrola celého systému.

Pro zlepšení kvality odpařené vody a odstranění výše popsaných problémů by bylo vhodné přistoupit k dávkování vybraných chemikálií nebo k provzdušňování odpadní vody, což probíhá v šachtách nebo v čerpacích stanicích. Prvně je důležité na síti vytipovat místo, kde odpadní voda ztrácí požadovanou kvalitu. Pokud by to byla jedna z čerpacích stanic na stokové síti (ještě před místem našeho měření), pak případně přenastavit četnost spínání čerpadla nebo právě sem osadit kompresor či dávkování chemikálie. Určitě je vhodné při použití jakýchkoli opatření měřit hodnoty ORP (případně i sulfanu), aby bylo zřejmé, zda mají zvolené metody dostačující účinnost.

Při výběru chemikálií je rozhodujícím faktorem často cena, způsob skladování a manipulace, účinnost odstranění sulfanu a jeho celková koncentrace. Aby se zápach nešířil z odpadní vody dál vzduchem, odstraňuje se většinou pomocí biofiltrů s různými náplněmi, praček vzduchu, adsorpcí nebo maskováním [9]. Provzdušňování se využívá především na tlakových částech potrubí nebo v ČS. Pokud ale přítékající voda vykazuje anaerobní vlastnosti, pak je snaha o zlepšení její kvality pomocí kompresoru zbytečná [9].

6 ZÁVĚR

Každý provozovatel kanalizace by měl znát problematická místa na stokové síti a předcházet tak komplikacím, které mohou v rámci odvádění odpadních vod vznikat. Vždy je lepší jakýmkoli problému přecházet než řešit případné následky. Odstranění nadměrného zápachu a udržení dobré kvality odpadní vody není vždy jednoduchou záležitostí a často jsou tyto kroky i finančně nákladné.

Z článku vyplývá, že dlouhé zdržení odpadních vod v kanalizačním systému způsobuje několik problémů a je potřeba se jimi zabývat. Provozovatel by měl určitě zavést některá ze zmíněných opatření a zlepšit tak kvalitu odpadní vody. Tím zajistí delší životnost kanalizačního systému a zabrání vzniku nepříjemného zápachu, který se šíří městem především v letních měsících.

Poděkování

Článek byl vytvořen v rámci standardního projektu FAST-S-20-6314 „Vybrané problémy vodního hospodářství obcí“.

Použité zdroje

- [1] MALÝ, Josef a Jitka MALÁ, c2006. *Chemie a technologie vody. 2., dopl. vyd.* Brno: ARDEC. ISBN 8086020509.
- [2] ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH VOD JAKO NÁSTROJ K OCHRANĚ ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ V ZEMĚDĚLSKÉ PRAXI A NA VENKOVĚ: Ministerstvo zemědělství ČR [online]. In: . Brno 2007, s. 58 [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/26962/cistení_odpadnich_vod.pdf
- [3] PITTER, Pavel. *Hydrochemie. 4., aktualiz. vyd.* Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2009. ISBN 978-80-7080-701-9.
- [4] HLUŠTÍK, P.; RACLAVSKÝ, J. Water quality comparison for various drainage systems for 2000 equivalent population. In *Advances in Environmental Engineering 2019*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bristol, UK: IOP Publishing, 2020. s. 1-6. ISSN: 1755-1315.
- [5] PYTL, Vladimír. *Příručka provozovatele čistírny odpadních vod. 2. vyd.* Líbeznice: Medim pro SOVAK ČR, c2012. ISBN 978-80-87140-26-0.
- [6] ČSN EN 16932-1, *Venkovní systémy stokových sítí a kanalizačních přípojek - Čerpací systémy Část 1: Obecné požadavky.* Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [7] Vyhláška č. 415/2012 Sb., vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší.
- [8] ŽÍLA, Radim *Možnosti odstranění zápachu na stokové síti.* Brno, 2018. 95 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Hlušík, Ph.D.
- [9] HLUŠTÍK, Petr, Ivo KORYTÁŘ, Stanislav MALANÍK a Petr HLAVÍNEK. *Eliminace zápachu ze stokové sítě.* *Vodovod.info* [online]. 30.9.2017 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <http://www.vodovod.info/index.php/kanalizace-a-cov/378-eliminace-zapachu-ze-stokovesite#.XAZFdtKJIU>

EVALUATION OF THE IMPACT OF INTAKE STRUCTURE SHAPES BASED ON FLOW HOMOGENEITY

Lucia Bytčanková^{*1}, Ján Rumann¹

^{*}lucia.bytcankova@gmail.com

¹Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Abstract

Intake structures are an important part of small hydropower plants, which affect the water flow. The flow quality is significantly influenced by the flow homogeneity in the intake to the turbines, as the inhomogeneous flow velocity distribution has a negative impact on the operation of the turbines. This paper describes the flow assessment in the intake of a low pressure small hydropower plant. The simulations proved a negative impact of the original structural design on the flow conditions in the intake such as a significant unequal distribution of flow and significant deviation in flow velocities from the recommended values. In order to optimize the velocity distribution in the intake, two modifications of the intake design have been proposed and assessed using the 2D numerical model.

Key words

Intake structures, homogeneity of flow, numerical modelling, flow conditions.

1 INTRODUCTION

The intakes are important parts of small hydropower plants (SHPP) that directly relate to the entire power plant function. A hydraulically appropriate design of the inlets is linked to achieving the required hydropower parameters. Proper design of the intake ensures sufficient water flow and should provide minimal pressure losses [1], [2]. The correct construction of the intake structure also prevents the formation of vortices in this area [3].

A great influence on the flow quality has homogeneity of the flow velocity field at the turbine intake. An inhomogeneous flow velocity field causes negative effects to the turbine performance such as decreasing of its efficiency or uneven mechanical load to turbine unit parts resulting in decreasing of its lifetime. Due to reduction of the costs of the project, the shapes of intake structures of SHPP with bulb turbines are often not correctly hydraulically designed. This fact results in operational problems of such SHPP [4].

Developing measurement capabilities have allowed the emergence of objective criteria that evaluate the interaction between objects of hydropower plant and turbine. The methodology of flow of low pressure SHPP is based on the starting points of the authors Fisher and Franke. Issues related to flow conditions are mostly related to low pressure hydropower plants with bulb turbines. This method is significantly applied to the results of numerical models [5].

The paper describes the evaluation of flow in the intake of a low pressure SHPP. To assess the flow, a 2D numerical model of flow was created, which should prove the suitability and possible problems of intake structures and their construction solutions using 2D modeling tools.

2 SMALL HYDROPOWER PLANT

The object of analysis of the suitability of intake structure design for homogeneous flow conditions was the Stará Ľubovňa SHPP, a small hydropower plant with bulb turbines. The small hydro power plant and weir control system maintains operating water level at 520.54 m for which the gates are designed. The control is carried out by the left field of the weir, through which a flow of up to 150 m³.s⁻¹ can be released. When larger flow rates occur, both weir's fields are used. The design flow of the SHPP is 18.2 m³.s⁻¹ [6].



Fig. 1 The small hydropower plant Stará Lubovňa.

3 METHODS

The 2D numerical model of flow of the SHPP Stará Lubovňa was created in the River2D program. River2D is free software, 2D model solve the basic mass conservation equation and two (horizontal) components of momentum conservation [7].

Tab. 1: An overview of simulated scenarios with their boundary conditions

Scenario	Upstream boundary condition	Downstream boundary condition			Flow		
	Q_p [$m^3 \cdot s^{-1}$]	TG1 [m]	TG2 [m]	WEIR [m]	TG1	TG2	WEIR
A	32.7	520.54	-	520.54	4.3	-	28.4
B	32.7	520.54	-	520.566	9.1	-	23.6
C	32.7	-	520.54	520.54	-	6.4	26.3
D	32.7	-	520.54	520.557	-	9.1	23.6
E	32.7	520.54	520.54	520.54	4.7	5.3	22.7
F	32.7	520.549	520.54	520.574	9.1	9.1	14.5

The inlet boundary condition (upstream boundary condition) was determined by the flow that flows into the modelled area. The outflow boundary condition (downstream boundary condition) was determined by the water level elevation. The upstream boundary condition is tagged Q_p and the flow rate $32.7 m^3 \cdot s^{-1}$ was used in the calculations. The downstream boundary condition determines the operating level of 520.54 m, which was changed based on the selected scenario. The downstream boundary condition was determined by the bulb turbine TG1, the bulb turbine TG2 and the left flap of weir called WEIR. Overall 6 different operational scenarios have been simulated (Tab. 1).

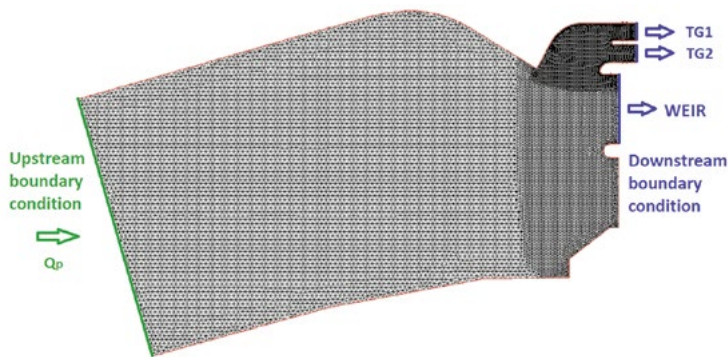


Fig. 2 Modelling mesh and boundary condition.

The simulation results were evaluated in turbine intake profiles (profile of screenings), where the distribution of flow velocities was evaluated. The flow velocities in this profile were compared with the average flow velocity in the turbine intake profile. The comparison is expressed by the percentage relative deviation of flow rates from the average flow velocity.

A flow $32.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ represent 30-day flow. The operating level 520.54 m was determined by the operational manual. The operating level tolerance is $\pm 80 \text{ mm}$ [6].

In order to optimize the velocity distribution in the intake structure, two modifications of the inlet shapes have been designed (Fig. 3). Current state simulations have shown an improper connection of the inlet structure to the river bed. The left wall of the inlet is connected to the river bed at an angle of approximately 60° , which causes the current to tear from the walls, creation of “flow shadows” and creation of a vortexes. These negative effects need to be eliminated to help improve the flow velocity distribution.

In the first modification, the original inlet structure was preserved. The modification consists in shifting the riverbank to the level of submerged screen and rounding the wall edges, while the length of submerged screen remained unchanged.

Modification 2 represents more radical changes in the structural part of the inlet. The submerged screen was extended by 5 m, the wall edges were rounded and the riverbank was connected smoothly to the intake. The construction of the left wall of the inlet was modified and connected to the river bed at an angle of 30° .

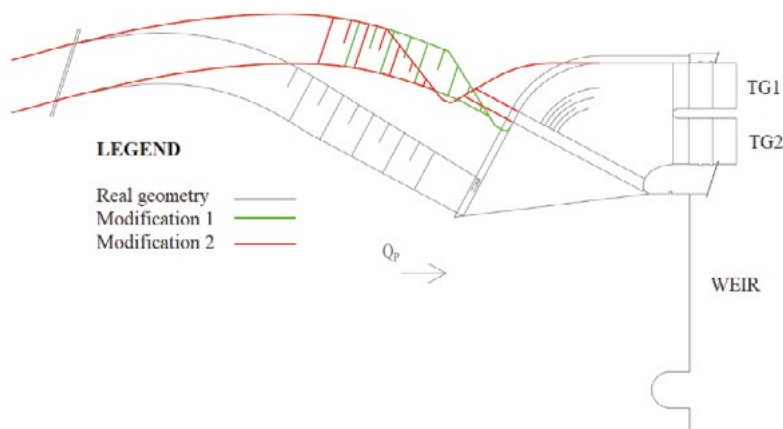


Fig. 3 Designs of modifications of the intake shapes.

Tab. 2 Modification 1 - simulated scenarios with their boundary conditions.

Scenario	Upstream boundary condition [m ³ .s ⁻¹]	Downstream boundary condition [m]			Flow [m ³ .s ⁻¹]		
	Qp	TG1	TG2	WEIR	TG1	TG2	WEIR
A	32.7	520.54	-	520.54	5.0	-	27.7
B	32.7	520.54	-	520.566	9.1	-	23.6
C	32.7	-	520.54	520.54	-	6.7	26.0
D	32.7	-	520.54	520.555	-	9.1	23.6
E	32.7	520.54	520.54	520.54	4.7	5.8	22.2
F	32.7	520.543	520.54	520.57	9.1	9.1	14.5

Tab. 3 Modification 2 - simulated scenarios with their boundary conditions.

Scenario	Upstream boundary condition [m ³ .s ⁻¹]	Downstream boundary condition [m]			Flow [m ³ .s ⁻¹]		
	Qp	TG1	TG2	WEIR	TG1	TG2	WEIR
A	32.7	520.54	-	520.54	6.3	-	26.4
B	32.7	520.54	-	520.56	9.1	-	23.6
C	32.7	-	520.54	520.54	-	6.9	25.8
D	32.7	-	520.54	520.555	-	9.1	23.6
E	32.7	520.54	520.54	520.54	5.7	5.9	21.1
F	32.7	520.543	520.54	520.564	9.1	9.1	14.5

The flow geometry and modelling mesh were created to edit the intake structure. The simulations were calculated for the upstream boundary condition flow rate $Q_p = 32.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. The downstream boundary condition varied depending on the modelled scenarios. An overview of the simulated scenarios of modifications is given in Tab. 2 and Tab. 3.

4 RESULTS

Six scenarios for real geometry were simulated. In the scenarios A, C, E the initial model calculations were performed. Based on the flow distribution, the operating levels were adjusted until the flow distribution was even for turbines with a maximum flow rate of $9.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. The scenarios B, D, F represent the resulting distribution of flow. The scenario F has been selected and the resulting flow velocity map is shown in Fig. 4.

Real geometry - Scenario F - Boundary conditions:

$Q_p = 32.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (total inflow), TG1 = 520.549 m; $9.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (water level; outflow), TG2 = 520.54 m; $9.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (water level; outflow), WEIR = 520.574 m; $14.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (water level; outflow).

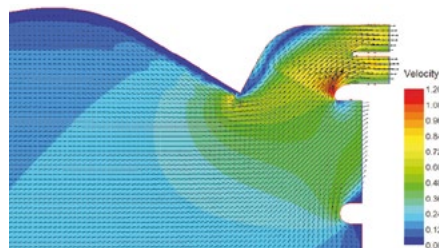


Fig. 4 Distribution of flow with vectors.

In order to improve the flow parameters, two modifications of the inlet shapes have been designed. For each modification, 6 simulations were also created. Adjustment simulations consisted of operating level changes for selected flow rates. Simulations A, C, E represent the initial calculations, simulations B, D, F represent the final calculations. Fig. 5 and Fig. 6 show the resulting flow velocity maps for scenario F.

Modification 1 - Scenario F - Boundary conditions:

$Q_p = 32.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (total inflow), $TG1 = 520.543 \text{ m}$; $9.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (water level; outflow), $TG2 = 520.54 \text{ m}$; $9.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (water level; outflow), $WEIR = 520.57 \text{ m}$; $14.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (water level; outflow)

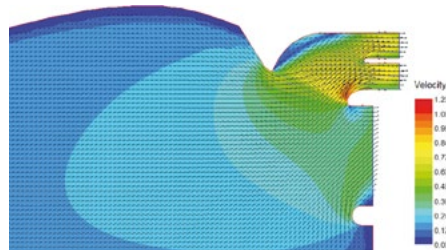


Fig. 5 Distribution of flow with vectors.

Modification 2 - Scenario F - Boundary conditions:

$Q_p = 32.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (total inflow), $TG1 = 520.543 \text{ m}$; $9.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (water level; outflow), $TG2 = 520.54 \text{ m}$; $9.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (water level; outflow), $WEIR = 520.564 \text{ m}$; $14.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (water level; outflow)

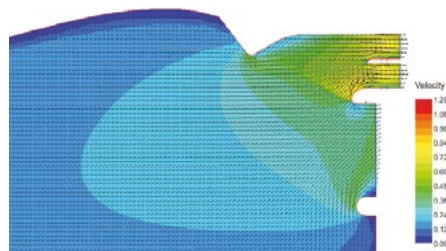


Fig. 6 Distribution of flow with vectors.

5 DISCUSSION

For real geometry uneven distribution of the velocity fields in the intake structure is obvious. The shape of the intake structure affect the flow in a way that in a certain section of the inlet a flow with opposing direction as required occurs. Flow simulations in the profile of screenings produced higher velocities in the left part of the flow profile. The flow velocities in the right section dropped sharply. The relative deviations of flow velocity vary from approximately + 25 % to - 50 %, which proves great inhomogeneity of the flow conditions in this area.

Modification 1 and modification 2 are compared with the real geometry of the intake structure. In modification 1, the relative deviations of flow velocity vary from approximately + 20 % to - 40 % for flow rate $Q_p 32.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. In modification 2, the relative deviations of flow velocity vary from approximately +15 % to -30 %.

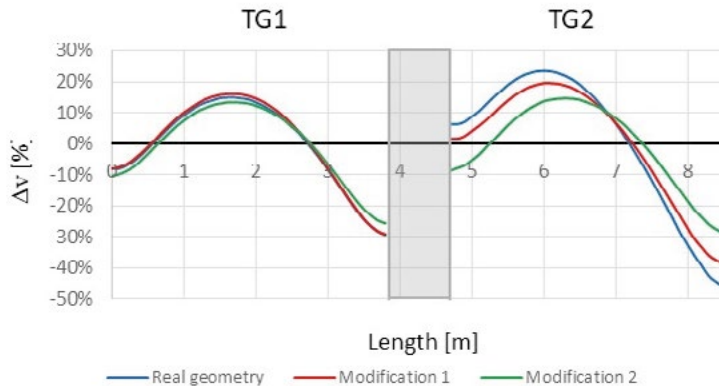


Fig. 7 Comparison of relative deviation of flow rates from the average flow velocity in the profile of screenings for $Q_p = 32.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

6 CONCLUSION

The contribution describes the assessment of flow conditions in the intake structure of a small hydropower plant with bulb turbines by the means of a 2D numerical model. Overall the use of this model shows its suitability for a quick analysis of flow conditions in intake structures of SHPP.

The application of this method on the Stará Ľubovňa SHPP shows that there is a significant uneven distribution of flow velocities in the inlets of the turbine units.

The application of this method on the Stará Ľubovňa SHPP shows that there is a significant uneven distribution of flow velocities in the inlets of the turbine units.

The real geometry is compared with two modifications of the intake and the results are evaluated. The results are graphs of relative deviations of flow rates from the average flow velocity in the profile of screenings. Changes in flow homogeneity occurred in the profile of screenings, where modifications help to more evenly distribution of flow velocities. Modifications of intake structure also prevent the current to tear from the walls, creation of “flow shadows” and creations of a vortexes.

Acknowledgements

This article was created with the support of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic within the Slovak Research and Development Agency, project no. APVV-18-0472.

Resources

- [1] Hodák, T. Využitie vodnej energie, STU v Bratislave, 1984.
- [2] Fošumpaur, P., Čihák, F. Design and Optimization of a Turbine Intake Structure, Acta Polytechnica, Vol. 45, No. 3, 2005, pp. 87-91.
- [3] Sun, H., Liu, Y. Theoretical and experimental study on the vortex at hydraulic intakes, Journal of Hydraulic Research, Vol. 53, 2015, pp. 787-796.
- [4] Angulo, M., Liscia, S., Lopez, A., Lucino, C. Experimental validation of a low-head turbine intake designed by CFD following Fisher and Franke guidelines, 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2014.
- [5] Fisher, F. K. Jr., Franke, G. F. The Impact of Inlet Flow Characteristics on Low Head Hydro Projects, International conference on hydropower, Portland, Oregon, 1987.
- [6] Lahký, J. Manipulačný poriadok Pre trvalú prevádzku vodnej stavby, Malá vodná elektrárň Stará Ľubovňa na rieke Poprad, Lahky Design Consulting, Zvolen, 2014, pp. 9-25.
- [7] Steffler, P., Blackburn, J. River2D Two-Dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat, University of Alberta, 2002, pp. 18-31.

STANOVENÍ RYCHLOSTI EROZE A ERODIBILITY PRŮSAKOVÉ CESTY V PÍSCÍCH

RATE OF EROSION AND ERODIBILITY CALCULATION DURING BACKWARD EROSION PIPING IN SANDS

Lubomír Petruľa*¹

*petruľa.l@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně: Fakulta stavební, Ústav vodních staveb, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Vnitřní eroze je jednou z nejčastějších příčin porušení vodního díla. Zvláštním případem je vznik průsakové cesty v základové spáře objektu, ke kterému dochází v případě překročení kritického hydraulického gradientu na okraji základové spáry. Zvláště nebezpečný je tento jev v případě, kdy je objekt založen na písku či na písčité zemině, která je velice snadno erodovatelná. Vlastnost erodovatelnost nebo erodibilita písků zatím není zcela jasně popsána. V tomto článku je popsáno experimentální zařízení použité pro stanovení rychlosti eroze vybraného písku, postup jejího stanovení a též postup odvození koeficientu eroze, který je nejčastěji používán pro vyjádření erodibility. Práce dále obsahuje kritické hydraulické gradienty, při kterých došlo v průběhu experimentů k erozi materiálů.

Klíčová slova

Zpětná eroze, rychlost eroze, kritické tečné napětí, koeficient eroze, kritický hydraulický gradient

Abstract

Internal erosion is one of the most common causes of failure of hydraulic structures. A special case is a backward erosion piping during which an exceeding of critical hydraulic gradient occurs on the edge of the structure foundation interface. This becomes especially dangerous for the structure when the foundation consists of sand or very sandy soil that is very easy to erode. The sand property of erodibility is not yet fully described. In this paper, an experimental device used for the rate of erosion determination for a picked sand is presented as well as a calculation of the erosion coefficient which is usually used to describe soil erodibility. Furthermore, the paper contains critical hydraulic gradients during which the erosion occurred.

Key words

Backward erosion, rate of erosion, critical shear stress, erosion coefficient, critical hydraulic gradient

1 ÚVOD

Privilegovaná průsaková cesta může vzniknout jak v tělese hráze, tak v jejím podloží. Zvláštním případem je vznik průsakové cesty v základové spáře, kdy je materiál vyplavován od paty vodního díla směrem proti proudu a dochází k tzv. zpětné erozi. Tento zvláštní případ je celkem častý u protipovodňových hrází podél vodních toků, kde dříve docházelo k rozlivům a k sedimentaci nesených materiálů, převážně písků. Proces vytváření průsakové cesty však nemusí být kontinuální (tj. vznik a vývoj během jedné události, kdy je překročen kritický hydraulický gradient), ale může být i přerušovaný (tj. v případě, kdy dochází ke krátkodobým překročením kritického hydraulického gradientu, které ale nestačí k úplnému porušení). Pro účely této práce bylo uvažováno s již částečně vytvořenou průsakovou cestou a byl zjišťován hydraulický gradient potřebný k její opětovné inicializaci (tj. kritický hydraulický gradient). Pro stanovení rychlosti eroze a koeficientů eroze bylo použito zařízení pro výzkum zpětné eroze. Jako materiál pro testování byl použit písek ze Bzence, na kterém bylo provedeno celkem 24 experimentů.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Jedním z hlavních kritérií pro vytvoření průsakové cesty v základové spáře je přítomnost „stropu“, který brání jejímu zasypaní (např. u betonových příčných staveb nebo u zemních hrází). Inicializace průsakové cesty v základové spáře je podmíněna ztekucením materiálu na pod vodním dílem a možností vyplavování materiálu dále po proudu [1]. Závislost mezi hladinou vody před objektem a průsakovou délkou byla popsána již na začátku 20. století [2]. Zde byla závislost popsána pomocí hydraulického gradientu. Podmínky, průběh ztekucení a kritické hydraulické gradienty pro ztekucení byly publikovány např. v [3] a [4]. V případě, kdy je již průsaková cesta vytvořena, potřebný hydraulický gradient pro její inicializaci je nižší než pro ztekucení. Právě tyto gradienty pro novou inicializaci jsou předmětem výzkumu dále uvedených autorů. Bligh [5] analyzoval vliv typu zeminy na délku průsakové cesty a maximální hydraulický gradient. Lane [6] na základě svého výzkumu Blighovu rovnici rozšířil pro výpočet průsakových délek jiných než vodorovných průsakových cest (např. podél těsnicích stěn). Další modifikace vztahu, modely a experimenty ve velkém měřítku prezentoval Sellmeijer [7]. Na jeho práci později navázala van Beek [1], která provedla validaci Sellmeijerova modelu. Uvedené metody však především zkoumají pouze průměrný kritický hydraulický gradient a neřeší lokální podmínky v průsakové cestě. Rychlosti eroze zeminy byly pro soudržné zeminy publikovány např. v [8] a [9]. Koeficient eroze zeminy byl odvozen právě z rychlosti eroze pomocí lineární regrese měřených dat [8]. Eroze písků však z hlediska rychlosti zatím nebyla zcela prozkoumána. Lze však očekávat, že její průběh by byl velice rychlý. Za účelem stanovení rychlosti eroze a koeficientů eroze vybraných písků bylo použito zařízení pro výzkum zpětné eroze v LVV FAST. Popis zařízení a postup při experimentu jsou popsány v následujících kapitolách.

3 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ A POPIS EXPERIMENTŮ

Zařízení pro výzkum zpětné eroze se skládalo z horizontálního propustoměru (vnitřní rozměry: 12 × 12 × 35 cm), kužele pro sedimentaci materiálu a hydraulického okruhu. Hydraulický okruh se skládal ze zásobní nádrže, čerpadla a malé nádržky, kterou lze pohybovat ve vertikálním směru za účelem nastavení a pozdějšího zvyšování horní okrajové podmínky proudění vody vzorkem. Dolní okrajová podmínka byla zajištěna úrovní odtoku vody ze sedimentačního válce. V těle propustoměru se nacházelo 17 piezometrů (vzdálenost mezi piezometry: 20 mm) pro sledování průběhu tlaků podél vzorku. Celý propustoměr byl vyroben z transparentního plexiskla pro umožnění sledování eroze průsakové cesty. Na straně nátoky se nacházela šterková vrstva tl. cca 70 mm, která sloužila pro zrovnornění proudění vody do čela vzorku. Rozhraní mezi šterkem a vzorkem bylo stabilizováno kovovým sítím a geotextiliemi. Ve vlastním vzorku byla ze strany odtoku předdefinována průsaková cesta o průměru cca 12 mm a délce 70-100 mm. Schéma zařízení ukazuje Obr. 1.

Plán experimentů

Pro výzkum rychlosti eroze byly zvoleny 3 frakce písku ze Bzence. Konkrétně se jednalo o frakce 0/2 mm (8 experimentů), 0,25/2 mm (8 experimentů) a 0,25/1 mm (8 experimentů). Různé frakce byly zvoleny i z hlediska možného ovlivnění kritického hydraulického gradientu (čím vyšší stejnozrnnost materiálu, tím horší zhutnění, tj. vyšší výsledná pórovitost vzorku). Pro porovnání materiálů byla stanovena jejich čísla nestejnozrnnosti C_u . Obecně lze říci, že všechny frakce bzeneckého písku byly stejnozrnné ($C_u < 5$). Křivky zrnitosti materiálů a vypočtená čísla nestejnozrnnosti ukazuje Obr. 2.

Metodika experimentů

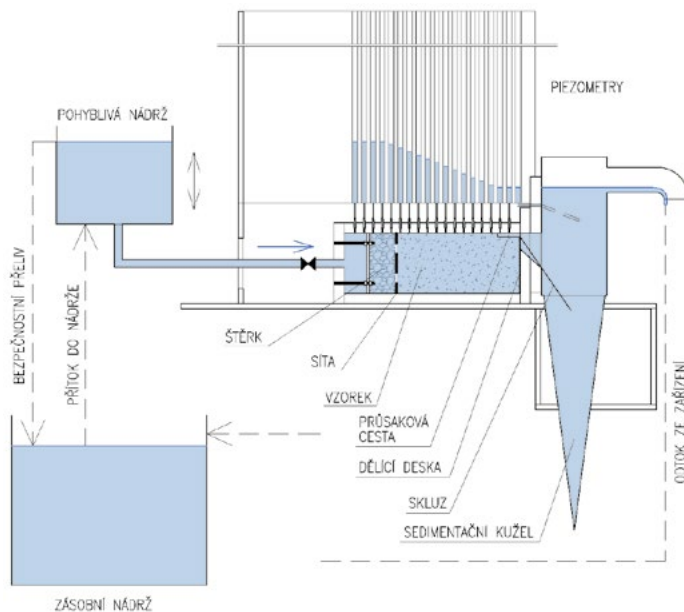
Vzorek materiálu o známé hmotnosti byl vsypán do propustoměru a byl zhutněn pomocí třepačky. Povrch vzorku byl urovnán do roviny a na povrch bylo umístěno síto s geotextilií a vrstva šterku. Propustoměr se uzavřel, byla změněna délka vzorku (cca 200-250 mm) a vypočtena jeho pórovitost. Vzhledem k nahodilosti zhutnění nebyla vždy získána stejná pórovitost. Naopak bylo možné později stanovit závislost kritického hydraulického gradientu na pórovitosti. Z výtokové strany propustoměru byla ve vzorku předdefinována průsaková cesta. Uzavřený propustoměr se připojil k sedimentačnímu kuželi a ke zdroji vody. Následně se vzorek pomalu nasýtil vodou.

Vertikálně pohyblivá nádrž byla postupně zvedána. Po každém zvednutí se vyčkal na ustálení proudění a bylo pozorováno, zda dochází k erozi. Zároveň byly zaznamenávány hydraulické gradienty na čele vytvořené průsakové cesty. Při zpozorování eroze byl zapsán kritický hydraulický gradient a byl pořízen obrazový záznam vývoje porušení, který byl později zpracován.

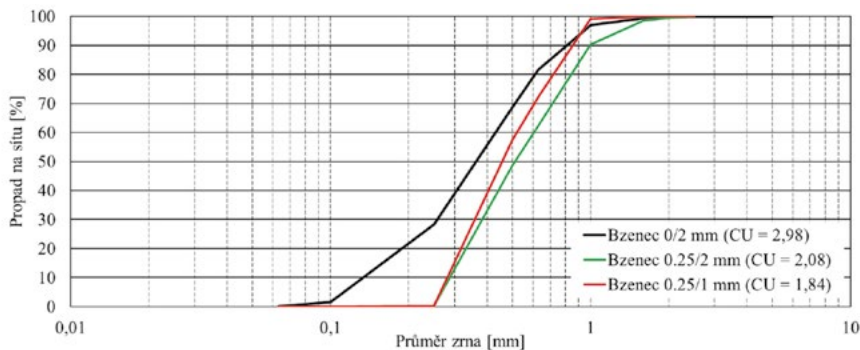
Odchyly měření

Po provedení experimentů byly stanoveny odchyly měření pórovitosti a kritického hydraulického gradientu. Pro stanovení odchylek měření pórovitosti bylo nutno stanovit odchyly vzniklé při měření rozměrů zařízení, konkrétně 0,01 mm, tj. 0,008 %. Maximální odchylka při stanovení plochy zařízení byla stanovena jako 0,017 % z plochy zařízení. Délka vzorku byla stanovena s přesností 1 mm (při průměrné délce vzorku 200 mm byla odchylka délky vzorku 0,5 %) a odchylka objemu vzorku byla 0,52 %. Následně byla stanovena i odchylka měrné hustoty zrn, pomocí které je pórovitost stanovována (10 kg/m^3 , tj. 0,38 %). Výsledná odchylka pórovitosti byla pro danou délku vzorku 3,3 %. Vzhledem k tomu, že testované vzorky měly délku 200–250 mm, jedná se o nejvyšší dosažitelnou odchylku pórovitosti.

Odchylna měření kritického hydraulického gradientu byla dána odchylkou měření rozdílu piezometrických výšek (absolutní odchylka: 0,5 mm). Při dosažených piezometrických výškách 100 mm v průsakové cestě a 120 mm v místě před průsakovou cestou, tj. rozdíl dvou sousedních piezometrických výšek $\Delta h = 20 \text{ mm}$ na čele průsakové cesty, se jednalo o odchylku 2,5 %. Po zahrnutí odchylky vzdálenosti dvou piezometrů (0,1 mm, 0,5 %) pak byla stanovena odchylka měřeného kritického hydraulického gradientu, jako 0,03, tj. 0,03 %.



Obr. 1 Schéma zařízení pro výzkum zpětné eroze.



Obr. 2 Křivky zrnitosti testovaných materiálů.

4 VÝSLEDKY

Výsledkem každého experimentu byla hodnota kritického hydraulického gradientu (Obr. 3) a údaje o průběhu eroze podél průsakové cesty. Obr. 3. ukazuje, že čím byla pórovitost vzorku vyšší, tím nižší byl kritický hydraulický gradient. Navíc je možné identifikovat, že čím více byl materiál stejnozrný, tím hůře ztuhlý byl a tím nižší byly i dosažené kritické hydraulické gradienty.

V předem určených časových okamžicích byla podle záznamu stanovena šířka a hloubka průsakové cesty a to v řezech po 10 mm. Mezi provedenými řezy pak byl vypočten objem průsakové cesty a hmotnost materiálu, který byl původně v průsakové cestě. Následně byla stanovena plocha dna dílčích částí průsakové cesty a hmotnosti erodovaného materiálu za dané časové úseky. Pro výpočet rychlosti eroze v úseku průsakové cesty platí:

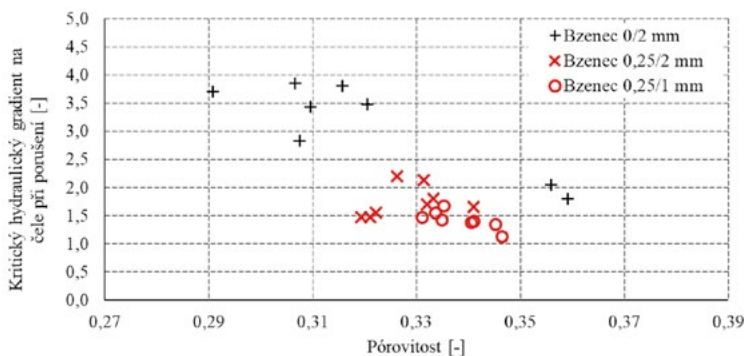
$$\dot{\varepsilon} = \frac{\frac{dm}{dt}}{\frac{A_1 + A_2}{2}} \quad [\text{kg/s/m}^2], \quad (1)$$

kde $\dot{\varepsilon}$ je rychlost eroze [kg/s/m^2], dm/dt je hmotnost ztracená v daném úseku vlivem eroze [kg/s], A_1 je plocha dna průsakové cesty na začátku časového kroku [m^2] a A_2 je plocha dna průsakové cesty na konci časového kroku [m^2]. Vzhledem k tomu, že eroze se v čase zintenzivňovala a po úplném porušení vzorku se opět snižovala, bylo provedeno zobrazení maximálních hodnot rychlostí eroze v Obr. 4. Rychlost eroze v průběhu experimentu dosahoval hodnot až 40 kg/s/m^2 . Dále bylo zjištěno, že na začátku průsakové cesty k výrazné erozi nedocházelo z důvodu stabilních podmínek proudění.

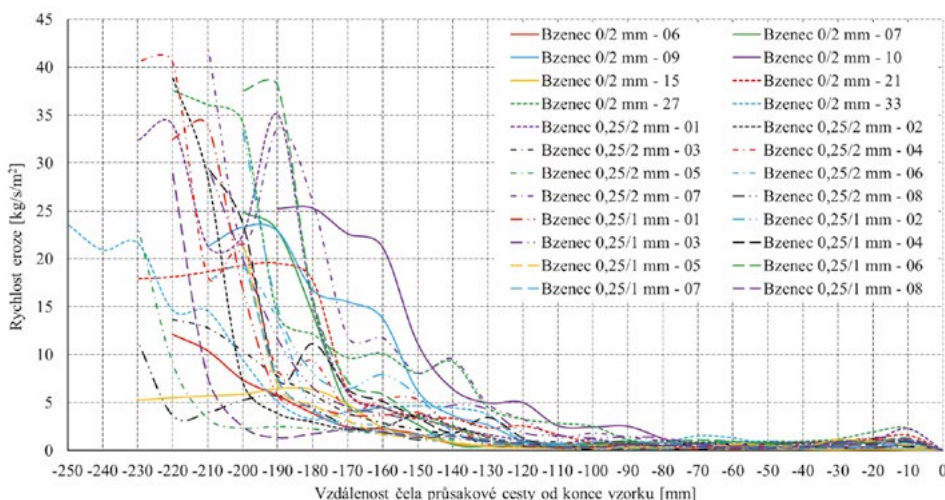
V okamžiku plného porušení vzorku bylo možné stanovit i koeficient eroze C_e , který je definován dle [8]:

$$C_e = \frac{\dot{\varepsilon}}{\tau - \tau_c} \quad [\text{s/m}], \quad (2)$$

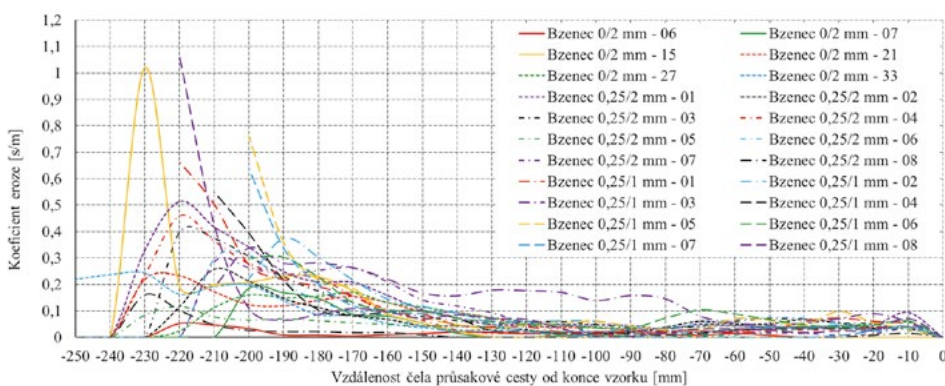
kde τ je tečné napětí vyvolané proudící vodou [Pa] a τ_c je kritické tečné napětí stanovené dle [10] [Pa]. Kritické tečné napětí dle výpočtů dosahovalo maximálně 1 Pa, zatímco tečné napětí od proudící vody dosahovalo hodnot 10-50 Pa. Lze tedy dojít k závěru, že písek byl v této konfiguraci jen málo odolný proti proudící vodě. Maximální hodnoty koeficientů eroze podél průsakové cesty ukazuje Obr. 5. Koeficient eroze se u provedených experimentů pohyboval v intervalu 0,1-1 s/m, přičemž vyšší hodnoty lze pozorovat v oblasti před 180-250 mm od začátku průsakové cesty, tj. cca na začátku vzorku, kde byl tlak nejvyšší a tudíž proudění při porušení nejintenzivnější. Koeficient eroze u začátku průsakové cesty dosahoval hodnoty asi 0,1 s/m a nedocházelo zde k výrazné erozi, ale spíše k transportu zrn písku.



Obr. 3 Kritický hydraulický gradient v závislosti na pórovitosti vzorku.



Obr. 4 Průběhy maximálních rychlostí eroze podél průsakové cesty.



Obr. 5 Průběhy maximálních koeficientů eroze podél průsakové cesty.

5 DISKUZE

Z výsledků vyplývá, že oproti publikovaným datům o soudržných zeminách jsou testované písky mnohonásobně náchylnější ke vzniku a vývoji průsakové cesty. Vysoké hodnoty rychlostí eroze jsou zapříčiněny vysokou rychlostí proudění vody v trubici a nedostatečnou odolností materiálu proti vyvolanému tečnému napětí. Autoři ve svých publikacích řeší spíše okamžik vzniku průsakové cesty než rychlost postupu jejího čela nebo řeší charakteristiky soudržných zemin, proto hodnoty rychlostí eroze a koeficientů eroze zatím nelze porovnávat. Ohledně hodnot kritického hydraulického gradientu na čele průsakové cesty lze říci, že je nelze porovnávat s ostatními autory z důvodu nedostatku relevantní literatury.

6 ZÁVĚR

Na stávajícím experimentálním zařízení bylo provedeno 47 experimentů na třech stejnozrných píscích. Pro materiály byla stanovena závislost kritického hydraulického gradientu na porovitosti vzorku a byly vypočteny rychlosti eroze v dílčích částech průsakové cesty. Pro plně porušené vzorky byl stanoven i koeficient eroze materiálu. Na základě výsledků byly stanoveny průběhy rychlostí eroze podél průsakové cesty, ze kterých vyplývá, že nejintenzivnější eroze probíhala u začátku vzorku. Obecně lze říci, že rychlost eroze vybraných písků dosahovala hodnot až 40 kg/s/m² a koeficient eroze se pohyboval v intervalu 0,1–1 s/m. Vzhledem k výsledkům

Ize dle očekávání konstatovat, že vybrané materiály byly vysoce erodovatelné a k plnému porušení vzorků došlo v rámci několika sekund.

Poděkování

Tento článek byl vypracován v rámci projektu specifického výzkumu FAST-S-19-5714 Pravděpodobnostní hodnocení vzniku filtrační nestability v zemních tělesech a podloží hydrotechnických staveb a FAST-J-20-6315 Stanovení nejistot u vybraných hydraulických úloh.

Použité zdroje

- [1] VAN BEEK, Vera Maria. Backward erosion piping: Initiation and Progression. Delft, Nizozemsko, 2015. Disertační práce. Technical University of Delft.
- [2] CLIBBORN, J. a BERESFORD, J. S. Experiment on passage of water through sand. 1902. Government of India, Central Printing Office.
- [3] INDRARATNA, Buddhima, ISRAR, Jahanzaib a RUJIKIATKAMJORN, Cholachat. Geometrical method for evaluating the internal instability of granular filters based on constriction size distribution. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2015, **141**(10).
- [4] ŘÍHA, Jaromír, PETRULA, Lubomír a HALA, Mario. Statistical analysis of experimentally determined critical hydraulic gradients for heave. *Geotechnique Letters*. 2020, **10**(2), 377-384.
- [5] BLIGH, W. G. Dams, barrages and weirs on porous foundations. *Engineering News*. 1910, **64**(26), 708-710.
- [6] LANE, E. W. *Security from Under-Seepage Masonry Dams on Earth Foundations*. Tranoe: ASCE, 1935, 100.
- [7] SELLMEIJER, Joannes B. *On the mechanism of piping under impervious structures*. Delft, Nizozemsko, 1988. Disertační práce. Technical University of Delft.
- [8] WAN, Chi Fai a FELL, Robin. *Investigation of Internal Erosion and Piping of Soils in Embankment Dams by the Slot Erosion Test and the Hole Erosion Test – Interpretative Report*. 2002. University of New South Wales. Sydney. Austrálie.
- [9] WAN, Chi Fai a FELL, Robin. 2004. Investigation of Rate of Erosion of Soils in Embankment Dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 373-380.
- [10] SHIELDS, A. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*. 1936. Vol. 26. Berlin, Německo.

SOFTWARE PRO SIMULACE PORUŠENÍ SYPANÝCH HRÁZÍ V DŮSLEDKU VNITŘNÍ EROZE

SOFTWARES FOR SIMULATION DAM BREACH DUE TO INTERNAL EROSION

Stanislav Kotaška^{*1}

^{*}kotaska.s@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Ústav vodních staveb, Veveří 331/95, 620 00 Brno

Abstrakt

V současné době je k dispozici řada softwarů umožňujících simulace porušení sypaných hrází v důsledku přelítí a vnitřní eroze zemin. V České republice se využívají empirické rovnice, vycházející z dat reálného protržení hrází anebo softwarů, které byly odvozeny v 90. letech minulého století jako DAMBRK, BREACH, BRDAM, BEED, FLDWAV, NATRZ doporučené v Metodickém pokynu č. 1 /2010 k technickobezpečnostnímu dohledu nad vodními díly [1]. Cílem práce je analyzovat nově vyvinuté dostupné softwarů simulující porušení sypaných hrází se zaměřením na vnitřní erozi, které se v České republice nepoužívají. Analýza softwarů bude provedena s využitím výsledků modelových (experimentálních) a reálných protržení hrází.

Klíčová slova

Zemní hráz, porušení, přelítí, vnitřní eroze, software

Abstract

Currently, a number of software are available to simulate the breach of earth fill dam due to overtopping or due to internal erosion. In the Czech Republic empirical equations based on real dam breach data or software which were derived in the 90s of the last centuries as a DAMBRK, BREACH, BRDAM, BEED, FLDWAV, NATRZ are used and recommended in Methodical Instruction No. 1 /2010 on technical supervision above water structures [1]. The softwares are based on various simplifying assumptions. The aim of this work is to analyse the newly developed available software simulating the dam breach due to internal erosion, which are not used in the Czech Republic. Software verification will be performed using the results of model (experimental) and real dam breach due to internal erosion.

Key words

Earth-fill dam, dam-break, overtopping, internal erosion, software

1 ÚVOD

Pro plány ochrany území, varovná opatření a sestavení krizových a evakuačních plánů pod vzdouvacími stavbami (určená vodní díla) je třeba znát parametry zvláštní povodně a rozsah ohroženého území pod dílem. Zkušenost ukazuje, že největší hrozbu představují extrémní povodňové situace, při nichž dochází pravidelně k poškození, případně haváriím hrází malých vodních nádrží, tj. vodních děl III. a IV. kategorie. Charakteristiky průběhu zvláštní povodně pod vodním dílem se řeší pomocí vhodných hydraulických a transportních modelů, které vycházejí z různých předpokladů.

Dostupné programové vybavení pro simulaci porušení sypaných hrází v důsledku vnitřní eroze zemin obsahují hydraulické a transportní moduly. Ty jsou založeny na četných předpokladech, využívají často empiricky získané rovnice a příslušné vstupní parametry. Softwarové prostředky (SW) zohledňují celou řadu dějů a procesů, které mají co nejpřesněji predikovat vznik a vývoj průsakové cesty, průlomového otvoru a odvodit hydrogram průtoku v profilu hráze. Softwarů jako AREBA-TUD nebo EMBREA umožňují provedení citlivostní analýzy vstupních parametrů, popř. stochastické modelování. Rešerše dostupných softwarových prostředků je popsána ve [2].

S cílem doporučit vhodný software pro praktické výpočty porušení sypaných hrází vnitřní erozí byla vytvořena pod vedením Electricité de France (EDF) a HR Wallingford (HRW) pracovní skupina „Internal Erosion Initiated Breach Model Performance Evaluation“, v níž jsou zastoupeni odborníci ze zainteresovaných zemí včetně České

republiky. Skupina je zaměřena na analýzu SW pro simulaci porušení hrází vnitřní erozí a na jeho celkové zhodnocení na základě souladu vypočtených charakteristik a dat získaných z laboratorních a polních měření.

2 POPIS VYBRANÝCH SOFTWAREŮ

Pro analýzu byly vybrány SW WinDAM C, AREBA-TUD, DL Breach, EMBREA, RUPRO a OvaBreach. SW byly vybrány na základě zkušenosti z dřívější analýzy skupinou Dam Safety Interest Group (DSIG) v roce 2017 předešlých verzí SW pro simulaci porušení sypaných hrází přelitím, dostupnosti SW, existence uživatelské podpory a manuálů [3]. V tomto příspěvku jsou dále uvedeny jen první čtyři vyjmenované SW, protože RUPRO [4] je uživatelsky nepřívětivé a pouze ve francouzštině bez anglické jazykové mutace, a OvaBreach se teprve vyvíjí společností ARUP. Výsledky z analyzovaných SW RUPRO a OvaBreach jsou pro potřeby analýzy poskytnuty pouze od vývojářů daného softwaru a v tomto případě nejsou předmětem analýzy.

WinDAM C

Software WinDAM C (Dam Analysis Modules založený na systému Windows) byl vyvinut United States Department of Agriculture (USDA) Agricultural Research Service (ARS) ve spolupráci s Natural Resources Conservation Service a Kansas State University. SW umožňuje řešit porušení sypaných hrází z různých materiálů. SW řeší porušení hráže zpětnou erozí od paty hráže [5].

SW byl validován na 4 skutečných epizodách, 7 polních zkouškách a na 18 laboratorních experimentech; dále byl validován na experimentech USDA – ARS. Tento SW byl zvolen v předchozím ověřování v rámci DSIG 2017, protože je vhodný rovněž pro predikci porušení hrází přelitím [3]. SW je volně šiřitelný a je možné jej zdarma stáhnout na stránkách USDA [6].

AREBA-TUD

Software AREBA (A Rapid Embankment Breach Analysis) byl vyvinut v roce 2011 v Technical University Delft (TU Delft) ve spolupráci na evropském projektu IMPACT [7]. V roce 2013 byl vývoj SW AREBA převzat společností HR Wallingford. SW AREBA se od té doby rozdělil na komerční SW distribuovaný společností HR Wallingford a nekomerční software AREBA-TUD nyní vyvíjený van Dammem ve spolupráci s Vysokým učením technickým v Brně (VUT). SW AREBA-TUD slouží pro výpočet porušení sypaných hrází z různých materiálů. SW AREBA-TUD je napsán v softwarovém prostředí MATLAB. V rámci spolupráce na projektu „Internal Erosion Initiated Breach Model Performance Evaluation“ byl kód modifikován a doplněn novými analytickými rovnicemi vyjadřujícími erozi materiálu.

Původní SW AREBA z roku 2012 byl validován na 4 historických porušeních hrází, 7 polních zkouškách a 18 laboratorních experimentech. Uvedený SW byl zvolen v předchozím ověřování v rámci DSIG jako vhodný pro rychlou a zjednodušenou predikci porušení hrází přelitím [7]. SW AREBA-TUD je soukromý ve vlastnictví TU Delft a VUT.

DL Breach

SW DL Breach (Dam and Levee Breach) byl vyvinut panem Wu na Clarkson University, NY, USA [8]. SW umožňuje řešení porušení sypaných hrází z různých materiálů. Model zohledňuje vliv větrovních vln.

SW DL Breach byl validován na 50 případových studiích skutečných poruch hrází a polních pokusech provedených v rámci projektu IMPACT. SW je volně šiřitelný a lze jej stáhnout na stránkách Clarkson University.

EMBREA

SW EMBREA (Embankment Breach) byl vyvinut společností HR Wallingford, je nástupcem softwaru HR Breach. SW byl vyvinut k řešení porušení sypaných hrází z různých materiálů. SW umožňuje zohlednit porušení krycích vrstev (opevnění, vegetace apod.) a zadání různé erodibility jednotlivých zón materiálů.

SW EMBREA byl validován obdobně jako AREBA na 4 skutečných poruchách hrází, na 7 polních a 18 laboratorních experimentech. Tento SW byl zvolen v předchozím ověřování v rámci DSIG jako jeden ze SW, který kvalitně predikuje porušení hrází přelitím [9], [10]. SW je volně přístupný na stránkách HR Wallingford v omezené „Lite“ verzi (pouze homogenní hráz, omezená volba metody výpočtu atd.) anebo za poplatek 14 500 Kč/rok v kompletní verzi, případně za 145 000 Kč za časově neomezenou licenci.

3 METODIKA

Cílem modelování porušení hráze vnitřní erozí je určení časového průběhu průtoku Q hypotetickou průsakovou trubicí ve vazbě na průběh polohy H hladiny vody v nádrži a průměru D průsakové trubice. Zjednodušeně se dá říct, že vnitřní eroze je první stupeň porušení hráze, který po zborcení průsakové trubice přechází v přelítí.

Vývoj průsakové trubice vznikající při porušení hráze vnitřní erozí je nejčastěji popsán následujícími časově proměnnými stavovými veličinami [7], [9]:

- objem vody v nádrži V [m³],
- poloha hladiny v nádrži H [m n. m.],
- průtok průsakovou trubicí Q [m³/s],
- průřezová rychlost vody v průsakové trubicí v [m/s],
- průměr, poloměr průsakové trubice D, r [m],
- tečné napětí na stěně průsakové trubice τ [Pa],
- rychlost eroze na jednotku plochy $\dot{\epsilon}$ [kg/s/m²],
- tlakový gradient v trubicí IE [-].

Analýza SW je provedena ve třech etapách. V každé etapě se zvolí případy porušení hrází z experimentů nebo případových studií porušení sypaných hrází vnitřní erozí. V první etapě se analyzují SW na jedné hypotetické případové studii bez známých parametrů a na experimentálních datech z polních pokusů malých homogenních hrází, u kterých jsou dobře zaznamenány všechny parametry porušení. V druhé etapě budou předmětem řešení hráze velkých přehrad např. Teton apod. Ve třetí etapě se pak analýza zaměří na ochranné hráze.

V současné době probíhá diskuze nad výsledky z analýzy první etapy. Každá etapa je rozdělena na dvě části nazvané blind a aware. V první části etapy, dostane modelář vstupní parametry do jednotlivých SW, ale nezná finální výsledek. Výsledné hodnoty jsou následně porovnány s měřeními. V části aware naopak modelář dostane výsledné hodnoty z měření z experimentů a snaží se nastavit parametry modelu tak, aby výsledky, a to hlavně hydrogram, co nejlépe predikoval reálné naměřené výsledky.

4 POPIS ANALYZOVANÝCH EXPERIMENTŮ

Pro analýzu první etapy byly zvoleny dobře dokumentované experimenty porušení sypaných hrází vnitřní erozí a jedno hypotetické porušení sypané hráze, viz Tab. 1.

Tab. 1: Vybrané experimenty pro první etapu analýzy softwarů.

Označení experimentu nebo testu	Organizace poskytující data k experimentům nebo testům	Popis experimentu	Počet testů	Reference experimentu
T1	HR Wallingford	Vnitřní eroze (piping)	0	-
T2	USDA-ARS-HERU Stillwater, USA	Vnitřní eroze (piping)	1	[11]
T3	Norsko – IMPACT	Vnitřní eroze (piping)	1	[12]

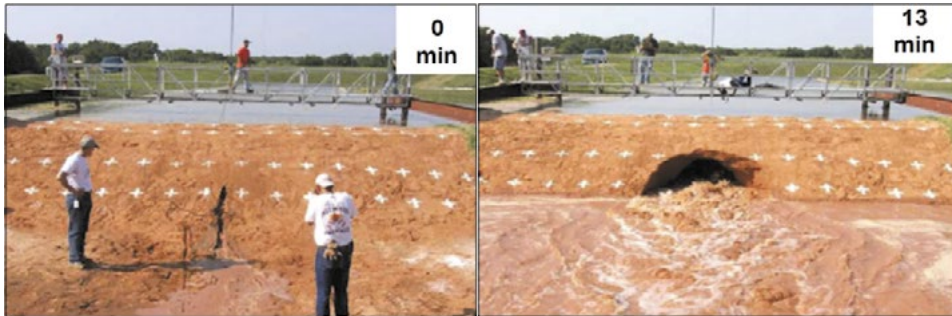
T1 – Hypotetický příklad porušení sypané hráze

Jedná se o hypotetické porušení tělesa kamenité sypané hráze s vnitřním těsněním. Nejdůležitější parametry jako erodibilita, kritické tečné napětí a počáteční velikost průsakové trubice musel každý, kdo modeloval porušení, zvolit expertním odhadem. Na hypotetickém případě se ověřila srozumitelnost práce se SW, otestovala se jejich funkčnost a sjednotily se požadavky na zadávání příkladů a publikování výsledků z jednotlivých SW.

T2 – Experiment porušení sypané hráze P1 v laboratoři USDA – HERU Stillwater, USA

Jedná se o polní test porušení sypané hráze vnitřní erozí v laboratoři USDA – HERU Stillwater, USA. V rámci realizovaného testu (Obr. 1), byly zaznamenány tyto údaje: data s fotografiemi a videonahrávkami událostí, znalost průtoku, odtoku, počáteční velikosti průsakové trubice, vlastností zeminy včetně testování charakteristik erodibility

a dalších vlastností zeminy. Hráz byla zhotovena z písku s jílovitou příměsí, k zborcení průsakové trubice došlo za 15 minut [11].



Obr. 1 Vybrané experimenty prováděné v laboratoři USDA – HERU Stillwater, USA [11].

T3 – Polní testy provedené v rámci projektu IMPACT v Norsku

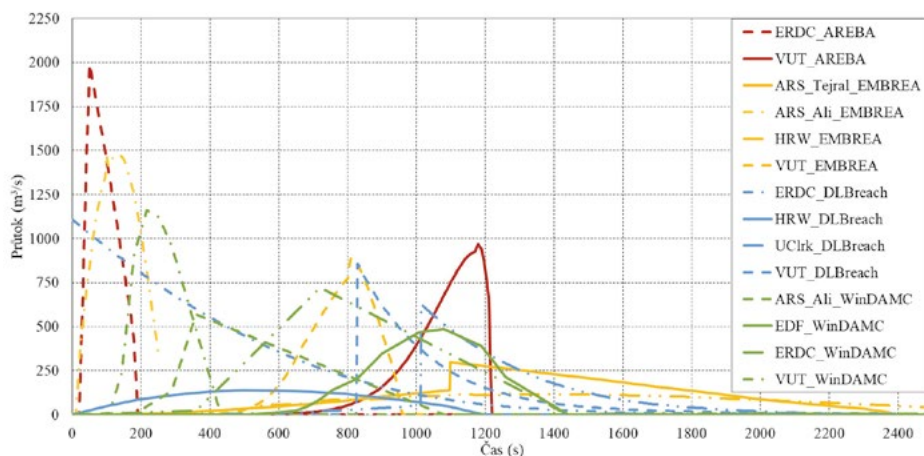
Polní test provedený v rámci projektu IMPACT v Norsku (Obr. 2) byl realizován jako řízený experiment. Hydraulické charakteristiky jsou neúplně zaznamenány, a to v důsledku nepřesností v okrajových podmínkách daných přírodními poměry. Stavba hráze rovněž nebyla dobře zdokumentována. U hráze byly známy vlastnosti zemín, které umožnily odhad kritického tečného napětí a erodibility. Přímé měření erozních charakteristik zeminy nebylo provedeno. Hráz byla homogenní z jílovitě morény (Obr. 2), k zborcení průsakové trubice došlo za 27 minut [12].



Obr. 2 Vybraný experiment prováděný během projektu IMPACT v Norsku [12].

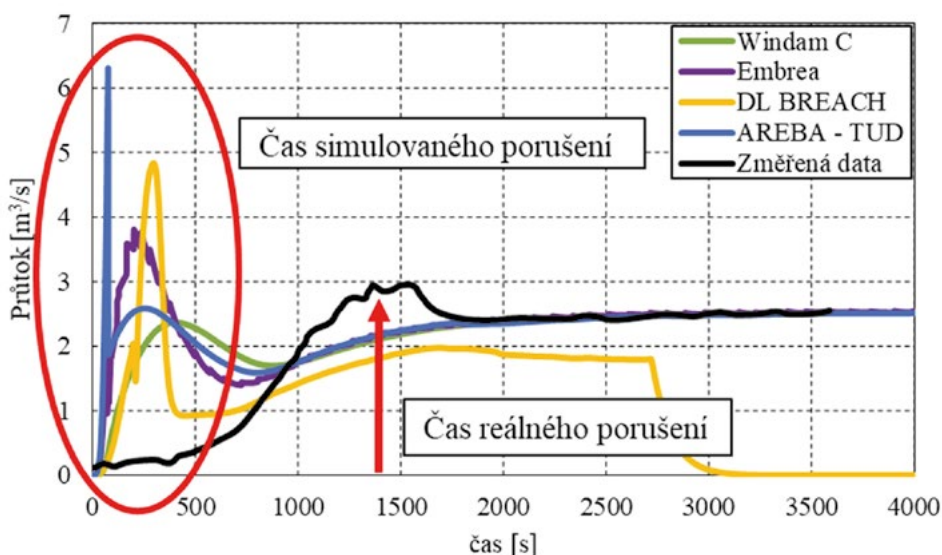
5 VÝSLEDKY

Pro vybrané SW prostředky popsané v kapitole 2, byly provedeny simulace zvolených experimentů popsaných v kapitole 3. Výsledky z první etapy analýzy T1 – Hypotetický příklad porušení hráze jsou uvedeny na Obr. 3, kde je vidět velký rozptyl výsledných kulminačních průtoků, a to jak velikostí, tak i časem dosažení. Velký vliv zde hraje volba neznámých vstupních parametrů zeminy. Jedná se o parametry zeminy jako pórovitost, erodibilita a kritické tečné napětí, které si každá instituce expertně odhadla sama. Tím se potvrdil velký vliv jednotlivých expertních odhadů na celkové výsledky. Aby byl tento vliv eliminován, ostatní experimenty T2 a T3, byly doplněny o všechny parametry neznámých veličin vstupujících do jednotlivých SW.



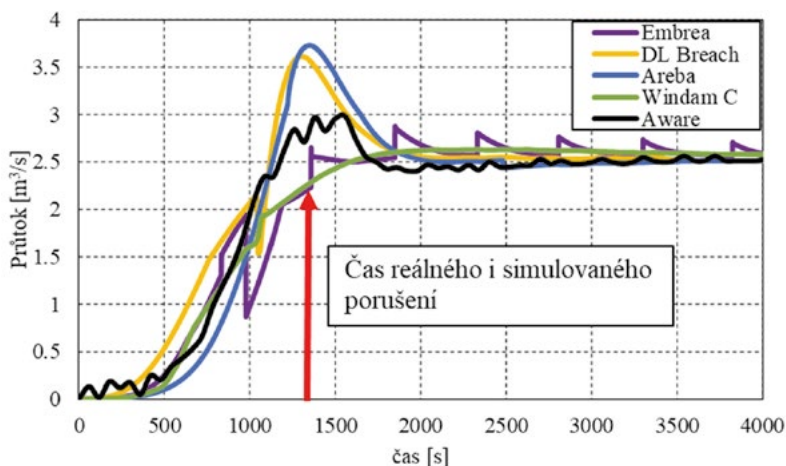
Obr. 3 T1 – Výsledky simulace porušení sypané hráze vnitřní erozí – pilotní hypotetický příklad (VUT – Vysoké učení technické v Brně; UClrk – Clarkson University; HRW – HR Wallingford; ERDC – Engineer Research and Development Center, EDF – Électricité de France, ARS – Agricultural Research Service).

Výsledky z T2 simulace porušení sypané hráze vnitřní erozí – HERU Stillwater, USA – část blind jsou uvedeny na Obr. 4., kde je vidět předčasný vznik zborcení průsakové trubice (porušení) a nadhodnocení maximálního průtoku.



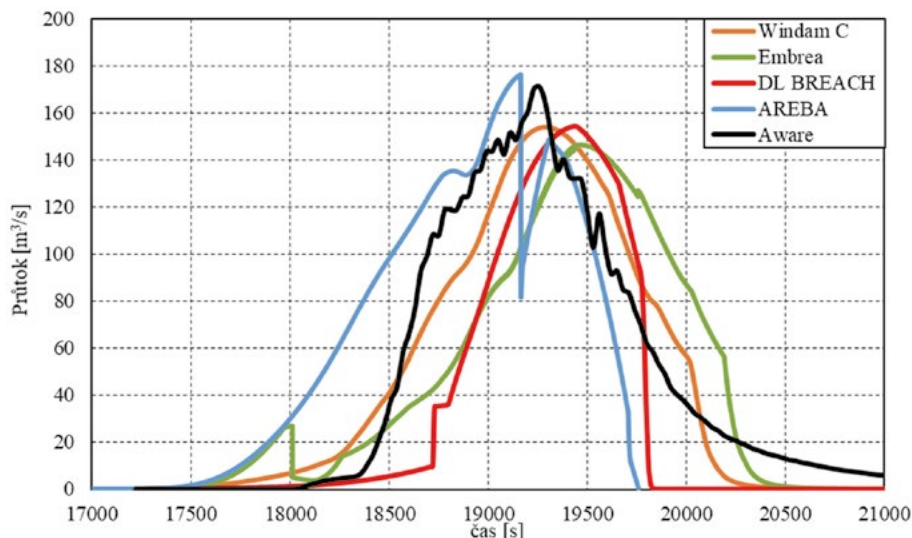
Obr. 4 T2 – Výsledky simulace porušení sypané hráze vnitřní erozí – HERU Stillwater, USA – část blind.

Výsledky z T2 – simulace porušení sypané hráze vnitřní erozí – HERU Stillwater, USA – část aware jsou uvedeny na Obr. 5, kde je vidět časová i kulminální shoda výsledků ze všech analyzovaných SW. U všech SW došlo k přepočtení hodnoty erodibility na základě vstupního tečného napětí a v případě softwaru DL Breach došlo ke změně kritického tečného napětí i erodibility. Výsledky se tímto přiblížily reálnému porušení, a to jednak hydrogramem průtoku, tak průběhem hladiny v nádrži a zároveň i velikostí průlomového otvoru. Z výsledků je patrné, že při správné volbě parametrů zeminy, a to hlavně erodibility a kritického tečného napětí, lze dosáhnout vysoké přesnosti predikce hydrogramu průlomového průtoku při vzniku porušení sypané hráze v důsledku vnitřní eroze.



Obr. 5 T2 – Výsledky simulace porušení sypané hráze vnitřní erozí – HERU Stillwater, USA – část aware.

Výsledky z experimentu T3 porušení sypané hráze v rámci projektu IMPACT část blind, která byla prohlášena za dostatečně shodnou, a tedy část aware v tomto případě nebyla modelována, jsou uvedeny na Obr. 6. Z grafu jsou patrné relativně shodné výsledky kulminačních průtoků a jejich časů dosažení s reálnými daty. Při změně parametrů docházelo ke snižování kulminačního průtoku a prodloužení doby jejich dosažení.



Obr. 6 T3 – Výsledky simulace porušení sypané hráze vnitřní erozí během projektu IMPACT v Norsku – část blind.

6 DISKUZE A ZÁVĚR

Krizové plány obcí často obsahují výsledky studií porušení sypaných hrází, jež určují ohrožení infrastruktury v daných obcích. Součástí těchto studií jsou mimo jiné simulace protržení hráze a odvození hydrogramu odtoku z nádrže v hrázovém profilu. Velikost kulminačního průtoků a čas jeho dosažení odpovídající zborcení průsakové trubice hrají klíčovou roli při krizovém plánování a přípravě evakuačního plánu v případě vzniku porušení vodního díla. K tomu mohou sloužit účelově sestavené nebo komerční SW. Ty mohou poskytovat různý uživatelský komfort, ale také značně odlišné výsledky. Současné mapy rozlivů vychází z výpočtů porušení sypaných hrází

vnitřní erozi řešených v SW, které byly odvozeny v minulém století. V pokroku řešení porušení hrází vnitřní erozi jsou v současné době novými SW výstižněji popsány děje vnitřní eroze a vývoje průsakové trubice. Vhodná by byla aktualizace výsledků porušení sypaných hrází, alespoň u staveb I. a II. kategorie, pomocí nově dostupných SW a jejich porovnání se současnými výpočty. V případě velkého rozdílu kulminačního průtoku by se aktualizovaly mapy rozlivů a postupu zaplavení při vzniku zvláštní povodně a následně i krizové plány.

SW uvedené v tomto příspěvku jsou vyvinuty na základě nedávného výzkumu a pokroku v oblasti techniky sběru dat, analýzy porušení hrází, simulací proudění, postupů mapování inundace a posouzení nejistot při modelování. Nově vyvinuté SW simulující porušení sypaných hrází v důsledku vnitřní eroze poskytují často rozdílné výsledky velikostí kulminačních průtoků, které jsou časově posunuté, v závislosti na volbě vstupních parametrů. Přitom je třeba zdůraznit roli vlastního řešitele – výpočtáře a přehradního inženýra, který musí při volbě vhodného modelu přihlídnout ke specifickým příslušného vodního díla. Velký vliv hraje odborný odhad a volba parametrů zeminy, hlavně erodibility a kritického tečného napětí, patrné z výsledků pilotního hypotetického příkladu (Obr. 3.), kdy tyto parametry chyběly a bylo na jednotlivých institucích jakou hodnotu odborně odhadnou. Současně při zadání stejných vstupních parametrů vypočítají SW odlišné výsledky oproti reálnému hydrogramu (Obr. 4). Po změně parametru erodibility, v závislosti na volbě kritického tečného napětí, vypočítají SW pouze mírně odlišné výsledky, což je patrné z Obr. 5. a Obr. 6., které jsou dostatečně přesné z pohledu velikosti kulminačního průtoku a času jeho dosažení.

Volba vhodného SW pro simulace protřžení sypaných hrází je specifická pro daný případ. Záleží na míře ohrožení a s tím související přesnosti výpočtu, účelu stavby, materiálové skladbě, výšce hráze apod. Výsledkem dalšího výzkumu je ověření jednotlivých SW a jejich doporučení použití pro specifické situace. Součástí budou doporučení pro volbu neznámých vstupních parametrů vstupujících do výpočtu.

Poděkování

Příspěvek byl vytvořen v rámci řešení projektu juniorského specifického výzkumu FAST-J-20-6315 – Stanovení nejistot u vybraných hydraulických úloh, specifického výzkumu FAST-S-20-6305 Nejistoty v hydraulickém posouzení transformačního účinku údolní nivy s použitím 2D a sprážených 1D-2D numerických modelů a v rámci disertační práce.

Použité zdroje

- [1] METODICKÝ POKYN Č. 1/2010 [online]. Praha: Ministerstvo zemědělství České republiky, 2010 [cit. 2020-10-13]. Dostupné z: http://www.dppcr.cz/prilohy/pravo/Souhrnny_MP_k_vykonu_TBD.pdf
- [2] KOTAŠKA, S.; ŘÍHA, J. (2019): Přehled metod modelování porušení zemních hrází. *Vodní hospodářství*. 69, 11, 2–10.
- [3] WORKING GROUP ON EMBANKMENT DAM EROSION AND BREACH MODELING, CEATI INTERNATIONAL DAM SAFETY INTEREST GROUP (2017): Evaluation of Numerical Models for Simulating Embankment Dam Erosion and Breach Processes. Department of the Interior, Bureau of Reclamation Technical Service Center, Denver Federal Center, Denver, USA, 2017, 104 p.
- [4] PAQUIER, A. Rupro, breach model used by cemagref during Impact Project. 1st Project Workshop (Wallingford Meeting), Wallingford, England, 2002.
- [5] VISSER, K.; TEJRAL, R., D.; NEILSEN, M., L. (2015): WinDAM C earthen embankment internal erosion analysis software. Proceedings of the Joint Federal Interagency Sedimentation and Hydrologic Modeling Conference, April 19-23, 2015, Reno, Nevada, 10.
- [6] NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE [online]. 2020© United States Department of Agriculture. [Cit. 20.2.2020]. Dostupné z: <https://www.nrcs.usda.gov/>
- [7] VAN DAMME, M.; MORRIS, M., W.; HASSAN, M., A., A., M. (2012): A new approach to rapid assessment of breach driven embankment failures. FRMRC Research Report, WP4.4, 2012.
- [8] WU, W. (2013): Simplified physically based model of earthen embankment breaching. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 139, 8, 837-851.
- [9] MOHAMED, M., A., A. (2002): Embankment breach formation and modelling methods. Ph.D. Thesis, The Open University, England.
- [10] MORRIS, M., W., (2011): Breaching of earth embankments and dams. Ph.D. Thesis, The Open University, England.
- [11] HANSON, G., J.; TEJRAL, R., D.; HUNT, S., L.; TEMPLE, D., M. (2010): Internal erosion and impact of erosion resistance. Proc. 30th U.S. Society on Dams Annual Conference, April 12-16, 2010, Sacramento, California. 773-784.
- [12] VASKINN, K., A.; LOVOLL, A.; MORRIS, M.; HASSAN M., A., A., M. Physical modelling of Breach formation: Large scale field test. IMPACT project, (www.floodsite.net), 2004.

CITLIVOSTNÍ ANALÝZA VLIVU PROSTOROVÉ DISKRETIZACE A PARAMETRŮ TURBULENTNÍHO MODELU PŘI 2D NUMERICKÉM MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ VODY

SENSITIVITY ANALYSIS OF SPACE DISCRETIZATION AND PARAMETER OF THE TURBULENT MODEL IN 2D NUMERICAL MODELING OF WATER FLOW

Stanislav Kotaška^{*1}

*kotaska.s@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Ústav vodních staveb, Veveří 331/95, 620 00 Brno

Abstrakt

Příspěvek je zaměřený na citlivostní analýzu vlivu vybraných vstupních parametrů na výsledky hydraulických výpočtů s použitím 2D numerických modelů proudění mělké vody. Konkrétně se jednalo o vstupní parametry související s prostorovou diskretizací řešené náhradní oblasti a volbou parametrů turbulentního modelu. V rámci příspěvku bylo provedeno srovnání hydraulických výpočtů proudění vody v prizmatickém korytě s použitím analytického řešení a různých variant 2D numerického modelu. Jednotlivé varianty 2D modelu se lišily v použitých parametrech turbulentního modelu a zvolenou velikostí buněk výpočetní sítě. Srovnání výsledků bylo provedeno na základě vypočtených úrovní hladin, resp. hloubek vody v ose koryta.

Klíčová slova

2D numerický model, HEC-RAS, turbulentní model, citlivostní analýza

Abstract

The paper focuses on the sensitivity analysis of the influence of selected input parameters on the results of hydraulic calculations using 2D numerical models of shallow water. Specifically, the input parameters related to the spatial discretization of the spare area and the choice of the parameters of the turbulent model. The paper compares hydraulic calculations of water flow in a prismatic channel using an analytical solution and various 2D solutions of numerical model. The variants of the 2D model differ in the used parameters of the turbulent model and selected size of grid cell. The comparison of results was performed on the levels of water resp. water depths in axis of the channel.

Key words

2D numerical model, HEC-RAS, turbulent model, sensitivity analysis

1 ÚVOD A POPIS SOUČASNÉHO STAVU

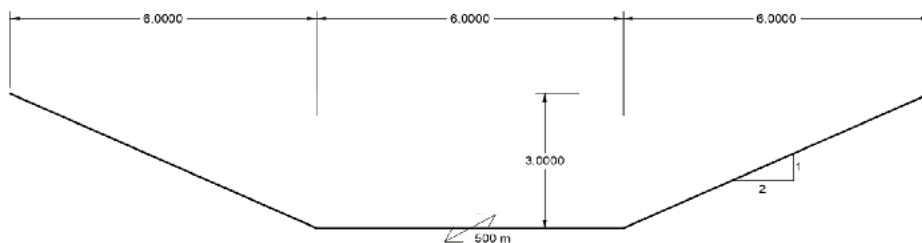
Pro účely hydraulických výpočtů proudění vody v otevřených korytech se v současnosti v inženýrské praxi využívají primárně 1D a 2D numerické modely. Volba dimenze modelu spolu s dalšími vstupními parametry může mít podstatný vliv na výsledky výpočtů. V případě použití 2D modelů je třeba oproti 1D modelům rovněž zohlednit vstupní parametry turbulentního modelu a zvolené rozměry buněk výpočetní sítě. V případě 2D numerických modelů založených na tzv. rovnicích proudění v mělkém proudu je poměrně obvyklé použití turbulentních modelů založených na Boussinesqově aproximaci [1]. Uvedený přístup využívá např. 2D numerický model v programu HEC-RAS. Jistou nevýhodou tohoto způsobu modelování turbulence je zpravidla nutnost specifikace bezrozměrného koeficientu nezbytného pro výpočet turbulentní viskozity, který je závislý na charakteru proudění a může nabývat různých hodnot v poměrně širokém rozpětí.

Způsobem volby zmiňovaného bezrozměrného koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity se zabýval např. Brunner v publikacích [2] a [3]. V publikaci [4] pak tento autor doporučuje poměrně velké rozpětí hodnot

uvedeného koeficientu. Hodnotami koeficientu se zabýval rovněž Vionnet a kol. [5], který ve své práci uvádí numerickou metodu LDM (Lateral Distribution Method), která slouží k výpočtu koeficientu turbulence v čase pro jednotlivé profily. Førlie [6] ve své práci ověřoval hodnoty koeficientů na reálné případové studii, kde zjistil že kalibrace tohoto koeficientu je v realitě obtížná a výsledné hladiny se při zadání koeficientu 0,2 a 5 se liší do 10 cm oproti výsledným hladinám modelu s vypnutými turbulencemi. Brunner v [7] uvádí, že koeficient lze nahradit úměrným zvýšením drsnostního součinitele dle Manninga n . Nejistotami vznikajícími při simulaci proudění u 1D/2D a 2D modelů se zabývali autoři Betsholtz a Nordlõf [8], kteří zjistili že u 2D modelů má volba prostorové diskretizace vliv na výsledky výpočtů. V diplomové práci [8] se už ale podrobněji nezabývali vlivem zvolené diskretizace náhradní oblasti v kombinaci s různými parametry turbulentního modelu. Předmětem tohoto článku je ověření vlivu velikosti elementů výpočtové sítě a hodnoty bezrozměrného koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity, jež mají přímý vliv na výsledný průběh hladin v korytě při 2D numerickém modelování proudění vody s použitím programu HEC-RAS.

2 METODA ŘEŠENÍ

Z důvodu eliminace dalších možných vlivů na výsledky výpočtů (místní ztráty, nerovnoměrnost rychlostního pole, náhlé kontrakce při změnách příčných profilů atp.) bylo pro citlivostní analýzu zvoleno prizmatické koryto lichoběžníkového průřezu. Pro tento typ koryta lze provést srovnání analytického řešení s výsledky 1D a 2D numerických modelů. Hlavní parametry koryta jsou shrnuty v Tab. 2 a na Obr. 1.



Obr. 1 Tvar prizmatického lichoběžníkového koryta.

Tab. 1 Parametry prizmatického lichoběžníkového koryta.

Parametr, jednotky	Hodnota
Sklon dna koryta - i [-]	0,002
Délka koryta - L [m]	500
Drsnostní součinitel dle Manninga n [-]	0,035
Průtok - Q [m ³ /s]	17,96
Dolní okrajová podmínka - hloubka vody - h_d [m]	1,5

Pro výše popsané koryto na Obr.1 byla následně provedena citlivostní analýza vlivu zvolené prostorové diskretizace náhradní oblasti a různých hodnot bezrozměrného koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity. Výpočty byly provedeny s použitím 2D numerického modelu v programu HEC-RAS. Uvedené programové vybavení je založeno na matematickém modelu dvojrozměrného proudění kapaliny o malé hloubce s volnou hladinou tj. tzv. rovnic mělkého proudu (FM) a rovněž, ve zjednodušené formě, jejich aproximací difúzní vlnou (DW). Rovnice mělkého proudu jsou odvozeny dekompozicí Navier-Stokesových rovnic. Soustava parciálních diferenciálních rovnic vychází ze zákona zachování hmotnosti a hybnosti. Zákon zachování hmotnosti je vyjádřen jako [1]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(h \cdot v_y)}{\partial y} + q = 0, \quad (1)$$

kde h je hloubka vody, q je bodový zdroj, resp. propad, v_x , v_y jsou složky vektoru svislicových rychlostí proudění a H značí úroveň hladiny vody nad srovnávací rovinou. Zákon zachování hybnosti je vyjádřen jako [9]:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) - c_f v_x + f v_y, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) - c_f v_y + f v_x, \quad (3)$$

kde t je čas, h je hloubka vody a v_x, v_y jsou složky vektoru svislicových rychlostí proudění, f je Coriolisovo číslo a c_f je součinitel tření na dně.

Pro modelování turbulence je použit 1 rovnicový model založený na stanovení turbulentní (tzv. "eddy") viskozity ν_t dle vztahu [4]:

$$\nu_t = D h u_*^2, \quad (4)$$

kde D je bezrozměrný koeficient z Tab. 1, h je hloubka vody a u_* je třecí (turbulentní) rychlost daná jako:

$$u_* = \sqrt{g R S}, \quad (5)$$

kde R je hydraulický poloměr, S je sklon čáry energie.

Vionnet a kol. [5] konstatují že hodnoty bezrozměrného koeficientu D by se měly pohybovat v rozpětí 0,07–0,3. Brunner [1] uvádí jeho hodnoty v Tab. 1.

Tab. 2 Rozpětí hodnot bezrozměrného koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity dle [1].

Vliv turbulence	Geometrie a povrch	koeficient D
Nízký	Přímé koryto, hladký povrch	0,11 - 0,26
Střední	Mírné meandry, drsný povrch	0,3 - 0,77
Vysoký	Velké meandry, velmi drsný povrch	2,0 - 5,0

Při řešení uvedené úlohy se předpokládá obecně definovaná oblast Ω s hranicí Γ , která je sjednocením částí Γ_1 a Γ_2 , $\Gamma = (\Gamma_1 + \Gamma_2)$ a $(\Gamma_1 \cup \Gamma_2)$. Počáteční podmínky vyjadřující známé (nebo zadané) průběhy funkcí $v_{x0}(x, y)$, $v_{y0}(x, y)$ a $h_0(x, y, t)$ ve všech bodech oblasti Ω v čase $t = 0$ [1]:

$$\begin{aligned} v_x(x, y, 0) &= v_{x0}(x, y) && \text{na } \Omega \cup \Gamma, \\ v_y(x, y, 0) &= v_{y0}(x, y) && \text{na } \Omega \cup \Gamma, \\ h(x, y, 0) &= h_0(x, y) && \text{na } \Omega \cup \Gamma. \end{aligned}$$

Okrajové podmínky vyjadřují dodatečná omezení, která udávají hodnotu hledané funkce v mezních bodech („okrajích“) nezávislé proměnné v rovnici:

$$\begin{aligned} 1. \text{ na hranici } \Gamma_1: & & 2. \text{ na hranici } \Gamma_2: \\ v_x(x, y, t) &= v_x(t)/\Gamma_1, & h(x, y, t) &= h(t)/\Gamma_2, \\ v_y(x, y, t) &= v_y(t)/\Gamma_1. & & \end{aligned}$$

kde $v_x(t)/\Gamma_1$ a $v_y(t)/\Gamma_1$ jsou zadané hodnoty složek vektoru svislicové rychlosti a turbulentní viskozity na Γ_1 a $h(t)/\Gamma_2$ je zadaná hloubka na Γ_2 . Úkolem je nalézt neznámé funkce v_x, v_y a h které splňují počáteční a okrajové podmínky a vyhovují rovnicím (1), (2) a (3).

V prostředí HEC-RAS je rovněž zavedena možnost zjednodušeného výpočtu rovnic mělkého proudu s použitím aproximace difuzní vlnou dle následujících rovnic [1]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right), \quad (6)$$

kde K_i jsou koeficienty hydraulické difúze ve směru x který se vypočítá jako [1]:

$$K_x = \frac{h^{5/3}}{n_x} \left| \frac{\partial H}{\partial s} \right|^{-1/2}, \quad (7)$$

a ve směru y se vypočítá jako [1]:

$$K_y = \frac{h^{5/3}}{n_y} \left| \frac{\partial H}{\partial s} \right|^{-1/2}, \quad (8)$$

kde h je hloubka vody, n_x a n_y je drsnostní součinitel dle Manninga ve směru x a y a $\partial H / \partial s$ vyjádřený jako [1]:

$$\frac{\partial H}{\partial s} = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2}. \quad (9)$$

Pro numerické řešení výše uvedených rovnic se v rámci programu HEC-RAS využívá metody konečných objemů. Podrobnější informace k numerickému řešení jsou uvedena např. v [4].

Citlivostní analýza vlivu prostorové diskretizace byla provedena pro následující kombinace vstupních parametrů modelu:

Model přímého koryta - citlivostní analýza volby prostorové diskretizace bez vlivu turbulence

- 2D DW - (velikost buňky výpočetní sítě 18 m; 6 m; 3 m; 1 m; 0,5 m; 0,1 m).
- 2D FM - (velikost buňky 18 m; 6 m; 3 m; 1 m; 0,5 m; 0,1 m; koeficient turbulentní viskozity $D = 0$).

Model přímého koryta - citlivostní analýza parametrů turbulentního modelu

- 2D FM - (velikost buňky 1 m, koeficient turbulentní viskozity $D = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,6; 0,7$)

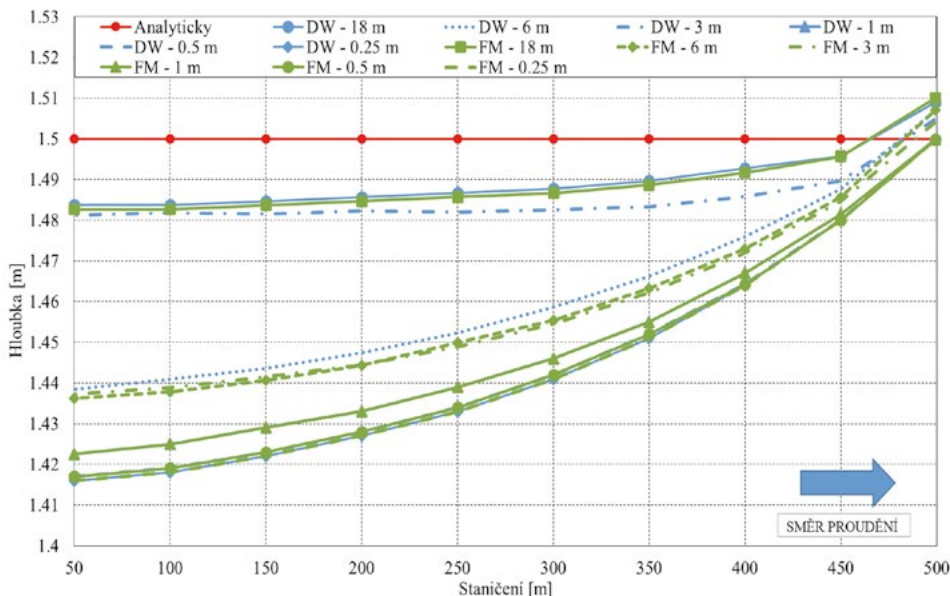
Model přímého koryta - citlivostní analýza volby prostorové diskretizace s vlivem turbulence

- 2D FM (velikost buňky 18m; 6m; 3m; 1m; 0,5m; 0,1 m; koeficient turbulentní viskozity $D = 0,30$)

3 VÝSLEDKY

Model přímého koryta - citlivostní analýza volby prostorové diskretizace bez vlivu turbulence

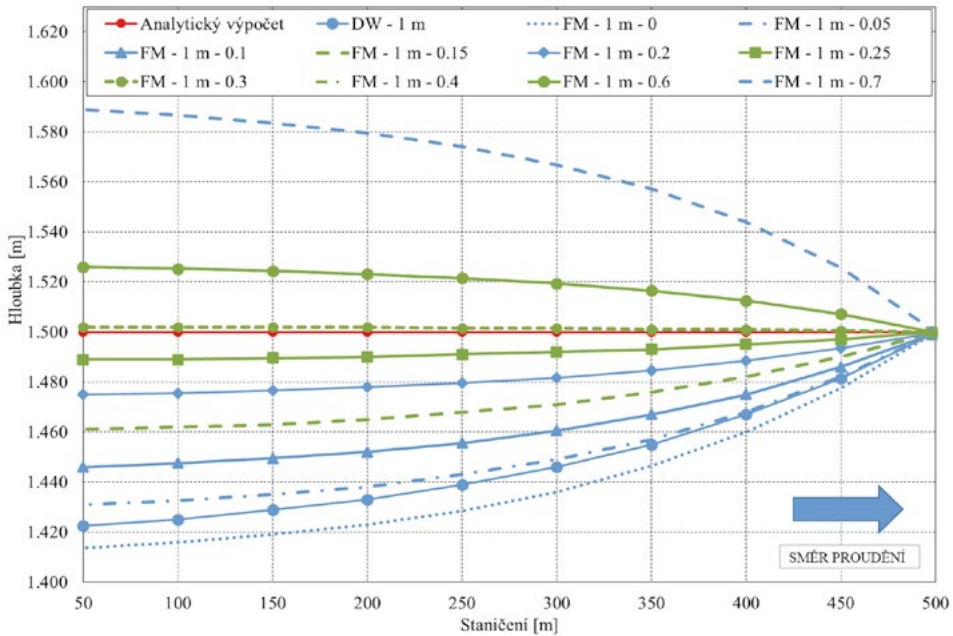
V případě citlivostní analýzy prostorové diskretizace bez vlivu turbulence byla provedena řada simulací s různými velikostmi velikostí buněk výpočetní sítě. Výsledky jsou uvedeny na Obr. 2.



Obr. 2 Výsledky hladin v podélném profilu modelu přímého koryta - citlivostní analýza volby řešení a prostorové diskretizace bez vlivu turbulence.

Model přímého koryta - citlivostní analýza parametrů turbulentního modelu

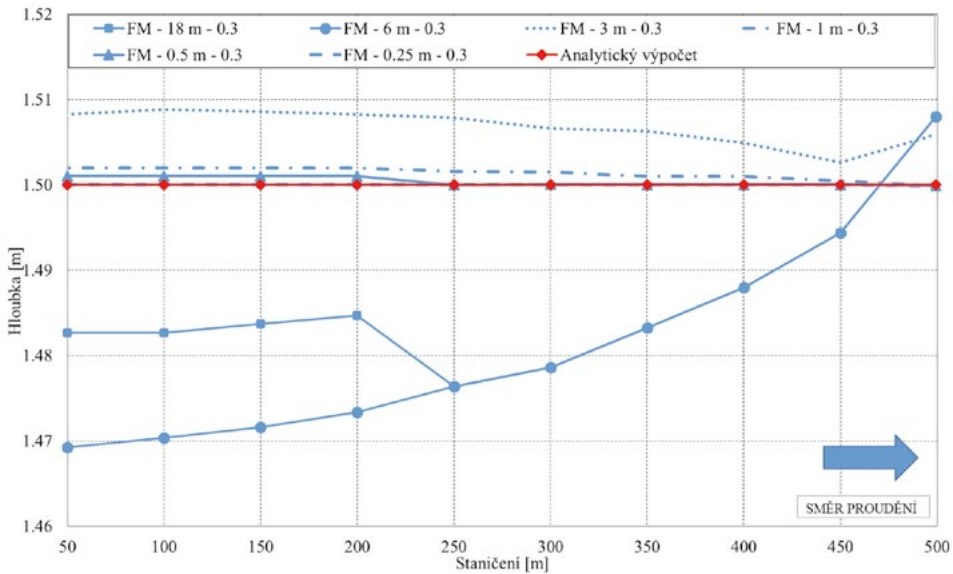
V případě citlivostní analýzy parametru turbulence byla pro velikost buňky 1 m provedena řada simulací pomocí škály doporučených hodnot z Tab. 1. Výsledky jsou uvedeny na Obr. 3.



Obr. 3 Výsledky hladin v podélném profilu modelu přímého koryta - citlivostní analýza parametrů turbulentního modelu - různé druhy parametrů turbulentního modelu.

Model přímého koryta - citlivostní analýza volby prostorové diskretizace s vlivem turbulence

V případě citlivostní analýzy prostorové diskretizace s vlivem turbulence se pro vhodný koeficient turbulentní viskozity $D = 0,3$ provedla řada simulací pomocí změny velikosti buňky sítě. Výsledky jsou uvedeny na Obr. 4.



Obr. 4 Výsledky hladin v podélném profilu modelu přímého koryta - citlivostní analýza volby prostorové diskretizace s vlivem turbulence.

4 DISKUZE A ZÁVĚR

V případě citlivostní analýzy vlivu prostorové diskretizace bez zohlednění turbulence u lichoběžníkového prizmatického koryta nejlépe korespondují s analytickými výpočty hloubek, výsledky diskretizace koryta o velikosti buňky 18 m a 3 m v případě DW tzn. jedna až šest buněk přes šířku koryta Obr. 2. V tomto případě nezáleží na volbě výpočtu rovnic mělkého proudu, avšak v případě difuzní vlny je výpočet rychlejší a robustnější. Se zvyšujícím počtem buněk diskretizujících koryto dochází k poklesu hladiny v korytě Obr. 2.

Z citlivostní analýzy parametru turbulence pro velikost buňky 1 m je patrné, že pro prizmatické lichoběžníkové koryto, s konstantním součinitelem drsnosti $n = 0,035$ (dle Manninga), sklonem 0,002 a velikostí buňky 1 m se nejlépe hladina v korytě shoduje s hladinou vypočítanou analyticky, při nastavení koeficientu turbulentní viskozity $D = 0,30$ (Obr. 3). Při porovnání výsledné turbulentní viskozity s hodnotami v Tab. 1 lze simulované koryto zařadit do intervalu s drsným povrchem a středními turbulencemi.

Z citlivostní analýzy vlivu prostorové diskretizace turbulence při zahrnutí koeficientu $D = 0,30$ je patrné, že velikost elementů výpočetní sítě má v případě velké diskretizace buněk přímý vliv na volbu koeficientu turbulentní viskozity D , a tedy stejný koeficient není vhodný pro všechny velikosti buněk. Testovaný příklad s koeficientem turbulentní viskozity $D = 0,30$ nejlépe koresponduje s analytickými výsledky hloubek při diskretizaci koryta s velikostí buňky 3 m a menší. Hladina je v těchto případech mírně nadhodnocena a při velikosti buňky 18 a 6 m je hladina naopak mírně podhodnocena (viz Obr. 4). Pro velikosti buňky menší než 1 m včetně, se výsledná hladina od analytického řešení liší v řádech cca do 1 mm v celé délce koryta. Z těchto výsledků vyplývá že pro modelový případ prizmatického lichoběžníkového koryta je nejvhodnější volba s koeficientem $D = 0,30$ a z hlediska přesnosti hladiny a časové úspory diskretizací koryta o velikosti buňky 1 m a menší.

V praktických situacích se turbulence v korytě výrazně liší v prostoru a čase. Koeficient D je za tohoto stavu obtížně kalibrovatelný a při rozsáhlém modelování např. záplavy je vhodnější jeho nahrazení úměrným zvýšením drsnostního součinitele dle Manninga n . Ne vždy je ale jeho nahrazení drsnostním součinitelem vhodné, jelikož podstatně ovlivňuje rozdělení rychlostního pole. V případě modelového příkladu hodnota koeficientu $D = 0,30$ nahrazena zvýšením drsnosti dle Manninga n o cca 20 % tak, aby bylo dosaženo obdobných úrovních hladin. V navazujícím výzkumu by mělo dojít k dalšímu ověřování hodnot koeficientu turbulence na podkladě dat z měření na fyzikálních modelech, popř. in situ.

Poděkování

Příspěvek byl vytvořen v rámci řešení projektu specifického výzkumu FAST-S-20-6305 Nejistoty v hydraulickém posouzení transformačního účinku údolní nivy s použitím 2D a spřažených 1D-2D numerických modelů a juniorského specifického výzkumu FAST-J-20-6315 - Stanovení nejistot u vybraných hydraulických úloh.

Použité zdroje

- [1] ZHANG, W.; CUNDY, T. W., (1989): Modeling of two dimensional flow. *Water Resour. Res.*, 25: 2019-2035.
- [2] BRUNNER, G. W. (2016): HEC-RAS River Analysis system: 2D Modeling User's Manual, CPD-68A., Davis California, 2016, 171 p.
- [3] BRUNNER, G. W. (2018): HEC-RAS River Analysis system: Verification and Validation tests, RD-52., Davis California, 2018, 154 p.
- [4] BRUNNER, G. W. (2016): HEC-RAS River Analysis system: Hydraulic Reference Manual. Version 5.0, Davis California, 2016, 538 p.
- [5] VIONNET, A. C.; TASSI, P. A.; VIDE, J. P. M. (2004): Estimates of flow resistance and eddy viscosity coefficients for 2D modelling on vegetated floodplains, *Hydrological Processes*, 18: 2907-2926.
- [6] FØRLIE, O. A. (2019): 2D numerical modeling of Manndalselva to ensure flood protection. Master thesis. Norway University of Science and Technology, Faculty of Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, 152 p.
- [7] BRUNNER, G. W. (2014): HEC-RAS River Analysis system: Using HEC-RAS for Dam Break Studies, TD-39, Davis California, 2014, 74 p.
- [8] BETSHOLTZ A., NORDLÖF B. (2017): Potentials and limitations of 1D, 2D and coupled 1D-2D flood modelling in HEC-RAS. Master thesis. Division of Water Resources Engineering, Department of Building & Environmental Technology, Lund University. Lund, Sweden. .
- [9] VREUGDENHIL, C. B. (1994): Numerical Methods for Shallow-water Flow, Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [10] FENG, K.; MOLZ, F. J. A 2-D, diffusion based, wetland flow model. *J. Hydrol.* 1997, 196, 230-250.

VLIV PARAMETRŮ TURBULENTNÍHO MODELU NA VÝSLEDKY HYDRAULICKÝCH VÝPOČTŮ S POUŽITÍM 2D NUMERICKÉHO MODELU HEC-RAS

INFLUENCE OF TURBULENT MODEL PARAMETERS ON THE RESULTS OF HYDRAULIC CALCULATIONS USING THE 2D NUMERICAL MODEL HEC-RAS

Šimon Pospíšilík¹

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

S dostupností výpočetní techniky a odpovídajícího programového vybavení dochází v poslední době ve větší míře k využívání 2D numerických modelů pro účely hydraulických výpočtů proudění vody v korytech toků a záplavových územích. Součástí 2D numerických modelů založených na tzv. rovnicích proudění v mělkém proudu je rovněž turbulentní model, jehož nastavení může do značné míry ovlivnit výsledky prováděných výpočtů. Obsahem předkládaného příspěvku je posouzení vlivu parametrů turbulentního modelu na výsledky hydraulických výpočtů s použitím 2D numerického modelu HEC-RAS. Ověření bylo provedeno na reálné lokalitě vybraného úseku vodního toku Svratka na území města Brna.

Klíčová slova

HEC-RAS, turbulentní viskozita, rovnice mělkého proudu, hydraulické výpočty

Abstract;

With the availability of computer technology and corresponding software, 2D numerical models have recently been used to a greater extent for the purposes of hydraulic calculations of water flow in riverbeds and floodplains. Part of 2D numerical models based on the so-called shallow water equations is also a turbulent model, the setting of which can significantly affect the results of calculations. The content of the presented paper is an assessment of the influence of turbulent model parameters on the results of hydraulic calculations using the 2D numerical model HEC-RAS. The verification was performed at a real location of a selected section of the Svratka watercourse in the city of Brno.

Key words

HEC-RAS, eddy viscosity, shallow water equations, hydraulic calculations

1 ÚVOD

V rámci hydraulických výpočtů proudění vody v korytech toků a záplavových územích se v poslední době stále více uplatňují 2D numerické modely založené na matematickém modelu zahrnujícím tzv. rovnice proudění v mělkém proudu. Tyto modely v různé míře umožňují rovněž zohlednění turbulence. K matematickému popisu turbulentního proudění se využívají tzv. turbulentní modely s různým pojetím modelování turbulence [6]. V našich podmínkách je pro účely hydraulických výpočtů poměrně rozšířené programové vybavení HEC-RAS, které v rámci 2D schematizace umožňuje využití turbulentního modelu založeného na Boussinesqově aproximaci [2], [6]. Její podstatou je zavedení tzv. turbulentní viskozity. Pro její výpočet je však nezbytná specifikace bezrozměrného koeficientu, který je závislý na charakteru proudění a může nabývat hodnoty v poměrně širokém rozpětí. Cílem příspěvku je posouzení vlivu uvedeného parametru turbulentního modelu na výsledky hydraulických výpočtů v případě použití 2D schematizace. Součástí výpočtů je rovněž ověření možného ovlivnění výsledků spočívající v zavedení zjednodušení do řešení rovnic proudění v mělkém proudu, a to v podobě aproximace difuzní vlnou. K ověřovacím výpočtům byl vybrán reálný úsek koryta toku Svratka na území města Brna, cca mezi km 50,2 (jez Kamenný mlýn) až km 53,935.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Hodnotami bezrozměrného koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity se ve své práci zabýval např. Brunner [4], a to na příkladech proudění v náhlém rozšíření obdélníkového koryta, obtékání výhonu v korytě, proudění mostním objektem a průlomové vlny během historické události při protržení hráze Malpasset. V uvedených případech bylo určeno orientační rozpětí hodnot bezrozměrného koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity na základě verifikace výsledků výpočtů s měřeními na fyzikálních modelech a datech zaznamenaných in situ.

V roce 2000 popsal Bates [5] nastavení bezrozměrného koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity při vývoji a kalibraci povodňového inundačního modelu LISFLOOD-FP.

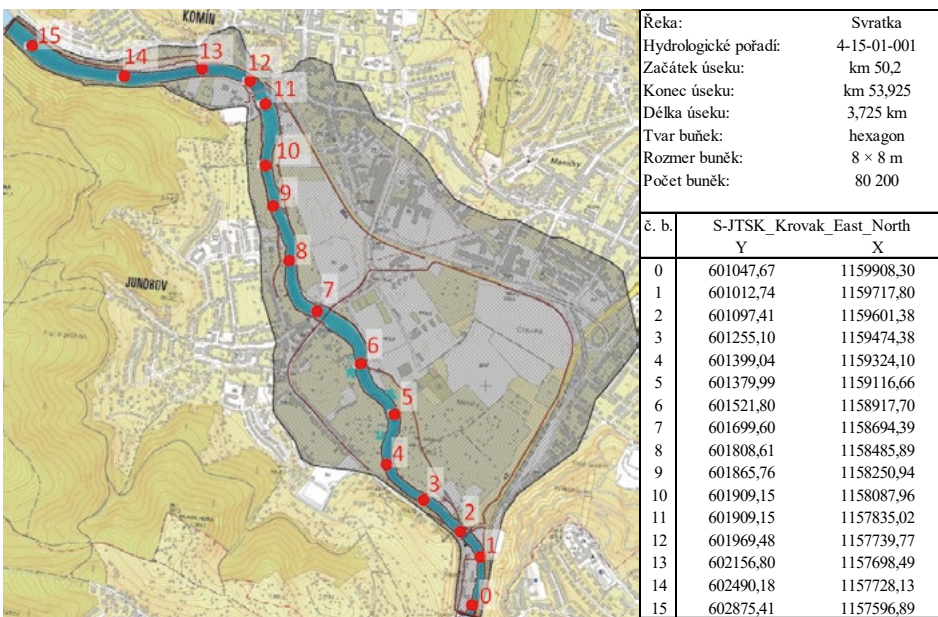
Orientační rozsahy hodnot bezrozměrného koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity v závislosti na morfologii terénu modelovaného území uvádí Brunner [1], [2] a dále zmiňuje nutnosti kalibrace bezrozměrného koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity při řešení hydraulických úloh.

Příspěvek se zabývá určením vlivu bezrozměrného koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity na výsledky hydraulických výpočtů na uvažovaném úseku vodního toku Svatky, konkrétně na úrovni hladin v korytě toku.

3 METODA ŘEŠENÍ

Analýza vlivu bezrozměrného koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity na modely proudění řeky Svatky (Obr. 1) vychází z variantních řešení 2D modelu proudění. Jednotlivé varianty se liší změnou hodnot bezrozměrného koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity. Sledovanou veličinou jsou úrovně hladiny v kontrolních bodech.

Výsledky sledovaných úrovní hladin 2D modelu byly doplněny o výsledky 2D modelu využívajícího k výpočtu aproximaci difusní vlnou (tj. bez turbulentního modelu) a 1D modelu.



Obr. 1 Situace modelu řeky Svatky v úseku km 50,2 až km 53,935.

Turbulentní (tzv. "eddy") viskozitu ν_t vstupující do řešení v 2D numerickém modelu programu HEC-RAS, lze vyjádřit vztahem [1], [2]:

$$\nu_t = D u_* \quad (1)$$

kde D je bezrozměrný koeficient pro výpočet turbulentní viskozity (Tab. 1) a u_* smyková rychlost definovaná jako [2]:

$$u_* = \sqrt{gRS} = \frac{\sqrt{g}}{C} |V| = \frac{n\sqrt{g}}{R^{\frac{1}{6}}} |V|, \quad (2)$$

kde R je hydraulický poloměr, g tíhové zrychlení, S sklon čáry energie, C Chézyho rychlostní součinitel, $|V|$ střední svislicová rychlost, n Manningův drsnostní součinitel.

Pro 2D modely proudění v programu HEC-RAS udává Brunner [1], [2] orientační rozsahy bezrozměrného koeficientu D pro výpočet turbulentní viskozity uvedené v Tab. 1.

Tab. 1. Bezrozměrný koeficient pro výpočet turbulentní viskozity [1], [2].

D	Intenzita míšení	Geometrie, povrch
0,11 až 0,26	Mírné	Rovné koryto, hladký povrch
0,3 až 0,77	Střední	Mírné meandry, střední nerovnosti povrchu
2,0 až 5,0	Výrazné	Výrazné meandry, drsný povrch

4 POPIS ŘEŠENÝCH VARIANT

2D numerický model byl vytvořen pro úsek vodního toku Svratka cca v km 50,2 (jez Kamenný mlýn) až km 53,935. Pro řešenou lokalitu byl vytvořen digitální model terénu na základě dat laserového skenování pro tvorbu digitálního modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G) České republiky [7], sonarového zaměření dna řeky Svratky v úseku mezi jezy Kamenný mlýn a Komín a geodetického zaměření profilů řeky Svratky. Model terénu byl vytvořen pomocí trojúhelníkové sítě sestavené z mračen bodů a geodeticky zaměřených profilů v programu Civil 3D. Dále byl model převeden z formátu trojúhelníkové sítě do rastru s rozlišením 0,25 m × 0,25 m.

Vrstva drsnost povrchu pokrývající zadanou lokalitu byla vytvořena na základě mapových listů ZABAGED a do modelu vložena pomocí rastru s rozlišením 0,25 m × 0,25 m. Součinitele drsnosti povrchu n dle Manninga byly určeny odborným odhadem. Hodnoty součinitelů drsnosti n jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2. Součinitel drsnosti povrchu dle Manninga.

Typ pokryvu	n
Hladina (vodní plochy)	0,035 0,020 0,015
Břehy koryta	0,045
Budovy	1
Zpevněné plochy (cesty zpevněné, parkoviště, silnice)	0,025
Les	0,12
Zahrady, louky	0,1

Samotné sestavení modelu v programu HEC-RAS proběhlo s použitím modulu RAS Mapper [1]. Do modelu proudění byl připojen digitální model terénu a vrstva drsnosti povrchu při zachování kvality vstupů (rozlišení rastru 0,25 m × 0,25 m). Pro zadanou oblast modelu proudění byly doplněny významné linie (břehové linie, terénní zlomy, příčné objekty v korytě). Dále byl v modelu vytvořen jez Komín v km 52,8 jako objekt SA/2D Area Conn [1]. Výpočetní síť řešené náhradní oblasti byla tvořena elementy ve tvaru hexagonu s rozměry cca 8 m × 8 m a s lokálním zjemněním v okolí významných linií. Výpočetní síť sestávala z celkového počtu 80 200 elementů.

Model proudění byl doplněn o počáteční podmínku tvořenou prázdným korytem řeky Svratky. Dolní okrajovou podmínku tvořila konzumpční křivka jezu Kamenný mlýn ve staničení km 50,2. Horní okrajovou podmínku reprezentoval kulminační průtok povodňové vlny s dobou opakování $N = 5$ let ($Q_5 = 115 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) [8] odpovídající kapacitě koryta řešeného úseku vodního toku a sklonem čáry energie ve staničení km 53,935. Vytvořený 2D model byl následně upraven dle jednotlivých řešených variant výpočtu, tj. různé hodnoty bezrozměrného koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity, použití aproximace difúzní vlnou atd.

Pro účely srovnání výsledků výpočtů byl vytvořen rovněž 1D numerický model koryta toku Svratky v zájmovém úseku tak, aby s maximální mírou kopíroval parametry 2D modelu (Obr. 1). Hlavní rozdíl mezi 2D a 1D modely byl v přístupu ke schématickému korytu toku. V případě 1D byla geometrie koryta zadána na základě osy a příčných profilů ve vzdálenostech 10 m.

Pro účely citlivostní analýzy vlivu bezrozměrného koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity bylo konkrétně vytvořeno 11 variant 2D modelu proudění řeky Svratky označených jako **2D_FM D**. Tyto varianty mají zadánu drsnost koryta součinitelem $n = 0,035$ dle Manninga a vzájemně se liší hodnotou bezrozměrného koeficientu D (0,00; 0,15; 0,25; 0,35; 0,05; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50; 1,75; 2,00). Varianty 2D modelu proudění byly dále doplněny o 2 varianty zohledňující různé drsnosti pro koryto toku a označené jako **2D_FM n**. V těchto variantách je drsnost koryta zadána hodnotami součinitele drsnosti $n = 0,020$ a $0,015$ při hodnotě koeficientu $D = 0,00$.

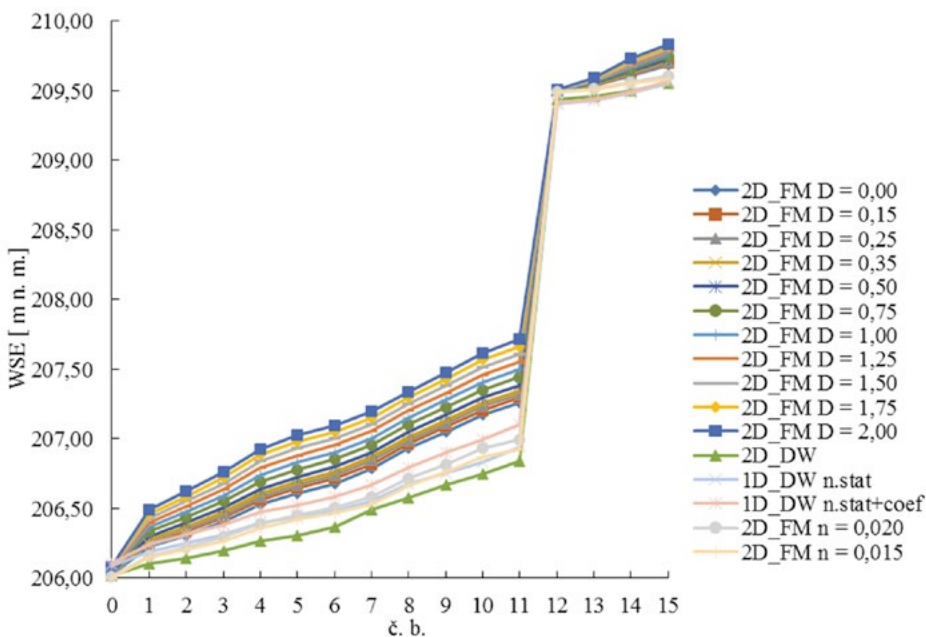
Pro porovnání 2D modelů proudění s 1D a 2D modely využívajících aproximaci difúzní vlnou byla vytvořena 1 varianta 2D modelu (**2D_DW**) a 2 varianty 1D modelů (**1D n.stat** a **1D n.stat+coef**). Varianty 1D modelu se vzájemně liší zadanou hodnotou koeficientů kontrakce a expanze pro stanovení místních ztrát, kdy pro model **1D n.stat** jsou koeficienty zadány nulovými hodnotami a pro model **1D n.stat+coef** jsou nastaveny hodnoty koeficientů kontrakce na 0,1 a expanze na 0,3.

5 VÝSLEDKY VÝPOČTŮ

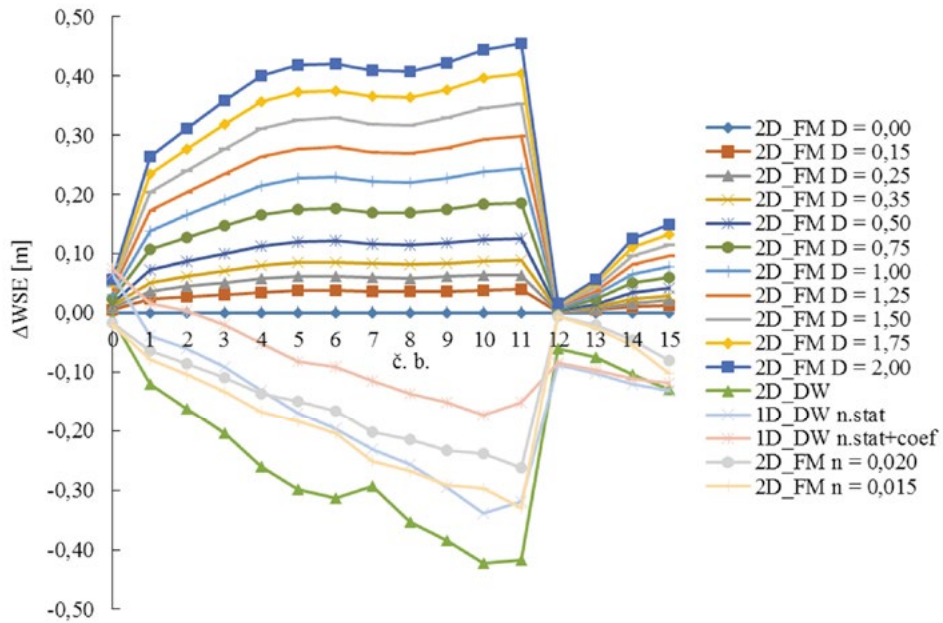
Celkem bylo provedeno 14 výpočtů s použitím 2D numerického modelu, z toho 1 simulace s použitím aproximace difúzní vlnou. Dále byly pro účely porovnání provedeny 2 simulace s použitím 1D numerického modelu proudění.

K porovnání výsledků simulací byly do modelového koryta řeky Svratky umístěny kontrolní body 0 – 15 (viz Obr. 1). Body 0 a 12 reprezentují úroveň hladiny v nadjezích jezu Kamenný mlýn a jezu Komín. Body 1 – 11, 13 – 15 reprezentují úrovně hladiny v korytě řeky Svratky.

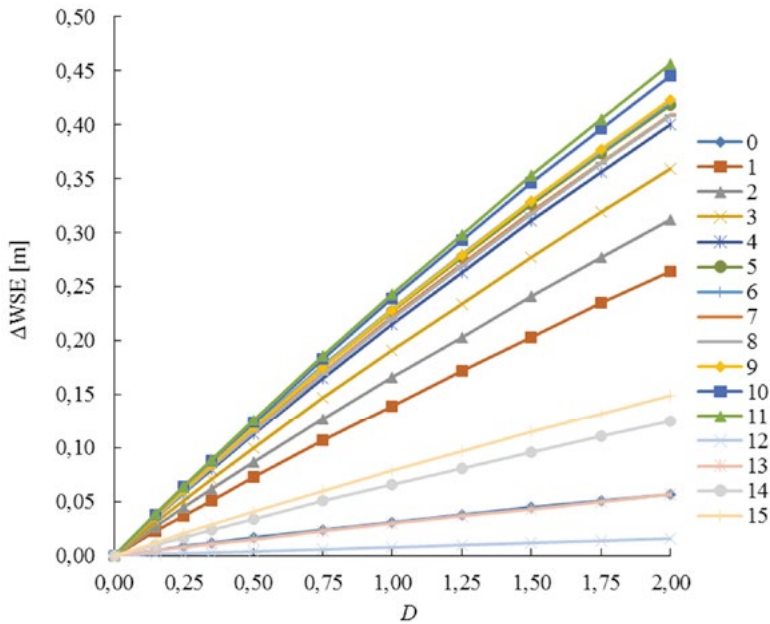
V kontrolních bodech byly určeny úrovně hladin v výsledcích jednotlivých modelů (Obr. 2.) a následně rozdíl hladin modelů vůči 2D modelu neustáleného proudění plné hybnosti se zadaným bezrozměrným koeficientem pro výpočet turbulentní viskozity $D = 0,00$ (Obr. 3). Dále byly určeny závislosti rozdílu hladin na bezrozměrném koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity v kontrolních bodech (Obr. 4).



Obr. 2 Úrovně hladin v kontrolních bodech modelu proudění řeky Svratky.



Obr. 3 Rozdíl úrovní hladin v kontrolních bodech vůči modelu 2D_FM D = 0,00.



Obr. 4 Závislost rozdílu úrovní hladiny na bezrozměrném koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity v kontrolních bodech.

6 DISKUZE VÝSLEDKŮ A ZÁVĚR

Z Obr. 2 a Obr. 3 je patrný nezanedbatelný vliv bezrozměrného koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity na úroveň hladiny při výpočtech s použitím 2D numerického modelu v programu HEC-RAS. Na výsledcích uvedených na Obr. 2, Obr. 3 a Obr. 4 je patrný trend zvyšující se hladiny ve vodním toku navázaný na zvětšení hodnot bezrozměrného koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity. Dle Obr. 4 lze určit, že změnou bezrozměrného koeficientu z hodnoty 0,00 na hodnotu 2,00 dojde ke zvýšení hladiny v modelovaném vodním toku v maximu až o 0,46 m. Dále je z Obr. 2 a Obr. 3 zřejmý vliv jezu Komín, kdy se změnou bezrozměrného součinitele pro výpočet turbulentní viskozity nedochází ke ztlačení úrovně hladiny.

Citlivostní analýzou byla zjištěna závislost rozdílu úrovní hladin na bezrozměrném koeficientu pro výpočet turbulentní viskozity v kontrolních bodech (Obr. 4), která může sloužit jako pomůcka při kalibraci 2D modelu v kontrolních bodech. V případech kalibrace modelu proudění řešeného úseku vodního toku Svratky by bylo možné využít již známé závislosti úrovně hladiny v kontrolních bodech pro určení bezrozměrného koeficientu vstupujícího do turbulentního modelu a tím docílit sjednocení výsledků modelů s případnými kalibračními daty v podobě úrovní hladin. Vzhledem k obtížně získatelným kalibračním údajům se zaměřenými rychlostmi proudění jsou však možnosti kalibrace bezrozměrného koeficientu D v reálných podmínkách poměrně omezené.

Otevřenou otázkou dále zůstává, jaký účinek by měla případná změna velikosti elementu výpočtové sítě modelu v kombinaci s různými parametry turbulentního modelu na vypočtenou úroveň hladiny ve vodním toku. Případně jaký účinek by měla změna součinitele drsnosti a zda nedochází ke vzájemnému ovlivnění s turbulentním modelem. Pro kalibraci 2D modelu lze tak za současného stavu primárně doporučit změnu hodnoty součinitele drsnosti. Potenciál případných citlivostních analýz lze spatřovat v možnosti stanovení nejistot modelů proudění.

Pro řešenou situaci řeky Svratky (Obr. 2) vykazují 2D modely neustáleného proudění převážně vyšší úrovně hladin, než 1D a 2D modely neustáleného proudění využívající aproximaci difuzní vlnou. Jelikož výpočty difuzní vlnou jsou aproximací řešení rovnic proudění mělkého proudu a pro uvažovanou situaci vykazují nižší úrovně hladin, lze dospět k následujícímu závěru. Řešení 2D modelů aproximací difuzní vlnou v programu HEC-RAS vykazuje v případě zvoleného úseku toku Svratky, při stejné morfologii koryta a drsnosti povrchu, celkově nižší úrovně hladin oproti řešení využívajícímu turbulentní model.

Poděkování

Príspevek vznikl za podpory projektu FAST-S-20-6305" Nejistoty v hydraulickém posouzení transformačního účinku údolní nivy s použitím 2D a spřažených 1D-2D numerických modelů".

Použité zdroje

- [1] Brunner, G.W. (2016): HEC-RAS River Analysis system: 2D Modeling User's Manual, CPD-68A., Davis California, 2016, 171 p.
- [2] Brunner, G.W. (2016) HEC-RAS River Analysis system: Hydraulic Reference Manual. Version 5.0, Davis California, 2016, 538 p.
- [3] Brunner, G.W. (2020): HEC-RAS River Analysis system: Modeler Application Guidance for Steady vs Unsteady, and 1D vs 2D vs 3D Hydraulic Modeling, TD-41, Davis California, 2020, 114 p.
- [4] Brunner, G.W. (2018) HEC-RAS River Analysis system: Verification and Validation tests, RD-52., Davis California, 2018, 154 p.
- [5] Bates, P. D., De Roo, A.P.J. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*. 2000, 236(1-2), 54-77
- [6] Jandora, J. (2008) Matematické modelování ve vodním hospodářství: Modul 1. Vysoké učení technické v Brně, 2008
- [7] Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G). Geoportál ČÚZK [online]. Český úřad zeměměřický a katastrální: Státní správa zeměměřictví a katastru, 2010, 2010 [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: <https://geoportal.cuzk.cz>
- [8] Evidenční list hlásného profilu č.375 [online]. VHD Povodí Moravy Brno, ČHMÚ Brno [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: <https://hydro.chmi.cz>

POUŽITÍ TŘÍ METOD MĚŘENÍ PRŮTOKU PRO POKRYTÍ ROZSAHU PRŮTOKU TENKOSTĚNNÝCH PŘELIVŮ S TROJÚHELNÍKOVÝM VÝŘEZEM

USE OF THREE FLOW MEASUREMENT METHODS TO COVER THE FLOW RANGE OF TRIANGULAR-NOTCH THIN-PLATE WEIR

Šimon Pospíšilík¹

¹ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika.

Abstrakt

Jednou z hlavních výhod tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem dle ČSN ISO 1438 je schopnost relativně přesného měření ve velkém rozsahu průtoku. Tato schopnost komplikuje měření průtoku jinými metodami při stanovení součinitele průtoku tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem. Práce se zabývá použitím a porovnáním tří metod měření průtoku za účelem pokrytí rozsahu měření tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem od $0,0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ do $3,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Příspěvek popisuje identifikaci systematických chyb měřidel a jejich korekci.

Klíčová slova

Tenkostěnný přeliv, trojúhelníkový výřez, přepad, kalibrace, měření průtoku

Abstract

One of the main advantages of thin-plate weir with a triangular notch according to ČSN ISO 1438 is the ability to accurately measure over a large flow range. This ability complicates the flow measurement by other methods in determining the discharge coefficient of thin-plate weir with a triangular notch. The work deals with the use and comparison of the three flow measurement methods in order to cover the range of measurement of thin-plate weir with a triangular notch from $0.0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ to $3.5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. The paper describes the identification of systematic errors of meters and their correction.

Key words

Thin-plate weir, triangular-notch, overflow, calibration, flow measurements

1 ÚVOD

Při použití tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem dle ČSN ISO 1438 [9] pro měření průtoku vody proudící otevřenými koryty jak ve stavební praxi, tak v laboratorních podmínkách je nutná znalost součinitele průtoku jednotlivých přelivů [8]. Pro laboratorní stanovení součinitele průtoku je nutné zajistit dostatečně přesné měření průtoku vody přepadající přes přeliv. Vzhledem k možnosti použití trojúhelníkových přelivů pro relativně přesné měření velkého rozsahu průtoku musí metody měření průtoku použité při stanovení součinitele průtoku odpovídat danému rozsahu. Jednou z možností zabezpečení velkého rozsahu měření průtoku při stanovení součinitele průtoku je využití více metod měření průtoku.

Použití více metod měření průtoku je založeno na přidělení části rozsahu průtoku k jednotlivým metodám. Přidělení rozsahu průtoku závisí na přesnosti a možnosti použití jednotlivých metod měření. Pro ověření správnosti a přesnosti přidělených metod je využito měření průtoku s překryvem rozsahu měření. V případě, že použité metody měření průtoku na sebe nenavazují v oblastech překryvu průtoků, je přikročeno k nalezení příčiny a ke korekci měření pomocí opravných funkcí.

Opravné funkce jsou stanoveny na základě provedených srovnávacích měření, kdy metody stanovení průtoku jsou použity současně. Výsledkem srovnávacích měření jsou rozdíly mezi měřenými hodnotami při stejných podmínkách měření. Tyto rozdíly jsou poté použity jako vstupy při regresním stanovení opravných funkcí.

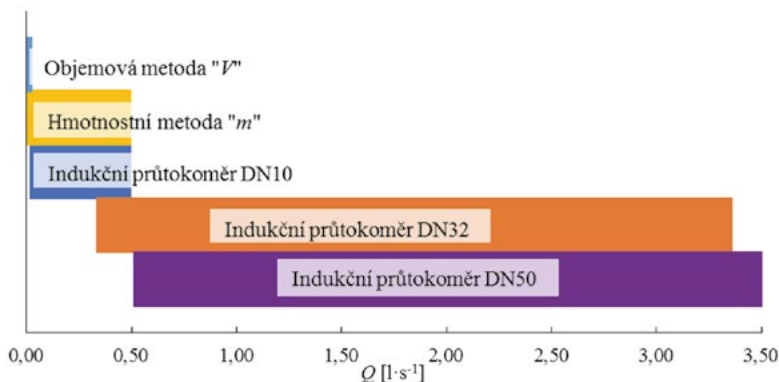
2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

V rámci hydraulického výzkumu tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem bylo měření průtoků v převážné míře provedeno pomocí odměrných nádob a tanků. Roku 1858 James Thompson [1] použil pro měření průtoků dva měrné barely o celkovém objemu 230 galonů. V. M. Cone [3] používal v roce 1916 sadu kalibrovaných tanků o celkovém obsahu 22 000 krychlových stop. Další významní autoři James Barr [2], D. R. Yarnall [4], [5], F. W. Greve [6], A. T. Lenz [7] použili při svých experimentech obdobné metody měření průtoků.

V současné době je možné použít nové metody pro dostatečně přesné měření průtoků, které výrazně urychlují a zpřesňují prováděná měření. Jedná se například o ultrazvukové průtokoměry nebo indukční průtokoměry [11].

3 METODIKA

Pospíšilík [10] popsal použití více metod pro stanovení průtoků vody přepadající přes tenkostěnné přelivy s trojúhelníkovými výřezy o úhlech 2,67°; 5,03°; 10,03°; 15,04°; 20,04°; 25,06°; 30,07°; 60,18°; 90°. Použití tří metod stanovení průtoků zde zajišťuje úplné pokrytí rozsahu průtoků sledovaných přelivů a vzájemnou kontrolu přesnosti použitých metod a umožňuje do jisté míry identifikovat systematické chyby. Pro velmi malé průtoky $< 0,03 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ byla použita objemová metoda. Hmotnostní metoda zaznamenávala průtoky v rozsahu 0 až $0,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Indukční průtokoměry byly použity v rozsahu 0,028 až $3,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ (Obr. 1).



Obr. 1 Rozsah použití metod měření průtoků.

Průtoky byly stanoveny pomocí více metod tak, aby byly splněny totožné podmínky při měření.

Hodnoty průtoků stanovené indukčními průtokoměry byly porovnány s hodnotami stanovenými objemovou a hmotnostní metodou stanovení průtoků. Dále byly hodnoty průtoků stanovené indukčními průtokoměry porovnány mezi sebou.

Analýzou nejistot měření byly stanoveny rozšířené kombinované nejistoty s koeficientem rozšíření $k = 2$, který odpovídá 95% pokrytí normálního rozdělení pravděpodobnosti. Rozšířené kombinované nejistoty indukčních průtokoměrů jsou uvedeny v kalibračních listech [13], [14] a [15].

Na základě vzájemného porovnání vykazovaných hodnot jednotlivými metodami a přístroji a na základě porovnání s jejich nejistotami stanovení se ukázalo, že dva způsoby stanovení průtoků vykazují jednostrannou odchylku. Jednalo se o stanovení hmotnostní metodou a o stanovení indukčním průtokoměrem DN32.

Objemová metoda stanovení průtoků

Objemová metoda stanovení průtoků je založena na vztahu

$$Q_v = \frac{V}{t}, \quad (1)$$

kde průtok Q_v je podílem zachyceného objemu vody V za čas t . Pro účely stanovení průtoků vody přepadajícího přes přeliv byl jako záchytná nádoba použit odměrný válec o objemu $1\,000 \text{ ml} \pm 5 \text{ ml}$. Válec byl použit pro zachycení průtoků menších než $0,03 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Měření času t potřebného k zachycení objemu vody V bylo provedeno

digitálními stopkami. Hodnoty vykazované objemovou metodou se v souhrnu neodchylovaly od ostatních metod v rámci nejistoty stanovení průtoku.

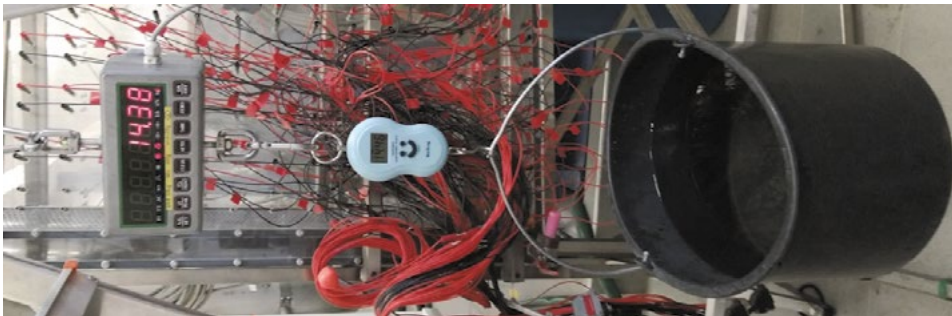
Hmotnostní metoda stanovení průtoku

Hmotnostní metoda stanovení průtoku je založena na vztahu

$$Q_m = \frac{m}{t \cdot \rho}, \quad (2)$$

kde objemový průtok Q_m je podílem hmotnosti zachycené vody m s násobkem hustoty vody ρ a měřeného času t . Hmotnostní metoda měření průtoku byla použita pro rozsah průtoku 0 až $0,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Vykazované hodnoty hmotnostní metodou se v souhrnu jednostranně odchylovaly od ostatních metod v rámci nejistoty stanovení průtoku. Bylo tedy přistoupeno k identifikaci systematické chyby a k jejímu odstranění pomocí opravné funkce.

Nejistotu ve stanovení průtoku hmotnostní metodou ovlivňují nejistoty stanovení hmotnosti, hustoty a času. Během měření byla hustota vody určena nepřímou pomocí měření teploty vody a následným odečtem z tabulky [12]. Měření teploty vody bylo provedeno digitálním teploměrem a ověřeno analogovým lihovým teploměrem. Měření času bylo provedeno digitálními stopkami, kdy nejistota měření času závisí především na reakční době měřiče. Pro její minimalizaci byla zvolena doba 180 s. Nejistota měření hmotnosti zachycené vody je daná především použitou vahou. Jelikož se hodnota hustoty považovala za smlouvanou hodnotu a měření času bylo provedeno stejně jako u objemové metody měření průtoku, pak bylo možné usoudit, že použité váhy nevykazují správnou hodnotu. Pro změření hmotnosti byla použita závěsná váha WeiHen, jejíž hodnoty byly ověřeny úředně kalibrovanou vahou Zeman do 60 kg. Při ověřovacím měření byly váhy WeiHen a Zeman do 60 kg umístěny v navazující sestavě (Obr. 2). Váha Zeman do 60 kg byla jednobodově zavěšena na nosný prvek a váha WeiHen byla zavěšena na závěs váhy Zeman do 60 kg. Na konec sestavy vah byla poté zavěšena nádoba o maximálním objemu 20 l. V rámci ověřovacího měření váhy WeiHen byly provedeny 3 série měření. Na začátku měření bylo na použitých vahách nastaveno nulové čtení odečtu hmotnosti. Poté byla do nádoby postupně napouštěna voda v objemovém kroku cca 1 l a odečítána naměřená hmotnost na vahách. Měření hmotnosti probíhalo v rozsahu 0 až 19,5 kg. Jednotlivé série měření byly zakončeny vyprázdněním nádoby a ověřením nulového čtení odečtu hmotnosti na vahách.



Obr. 2 Sestava pro kalibraci měřidla hmotnosti.

Indukční průtokoměry

Stanovení průtoku Q_{IP} pomocí indukčních průtokoměrů je provedeno měřením objemu vody V proteklé průtokoměrem za čas t dle vztahu (3)

$$Q_{IP} = \frac{V}{t}. \quad (3)$$

Pro pokrytí rozsahu měření průtoku (Obr. 1) byly použity indukční průtokoměry IP DN10, IP DN32 a IP DN50. Při vzájemném porovnávacím měření byly průtokoměry zapojeny v sestavě, kdy na průtokoměr IP DN32 navazoval průtokoměr IP DN10, nebo průtokoměr IP DN50. Pro zajištění neměnných podmínek měření bylo měření na průtokoměrech prováděno současně při ustáleném průtoku. Doby jednotlivých měření průtoku byly stanoveny tak, aby byla zajištěna možnost odečtu na zkoušených průtokoměrech, a zároveň, aby se doby měření překrývaly. Analýzou vlivu chyb byly stanoveny doby měření na 180 s a 240 s. Hodnota 240 s byla přiřazena k průtokoměru o vyšším průměru DN.

- IP DN10

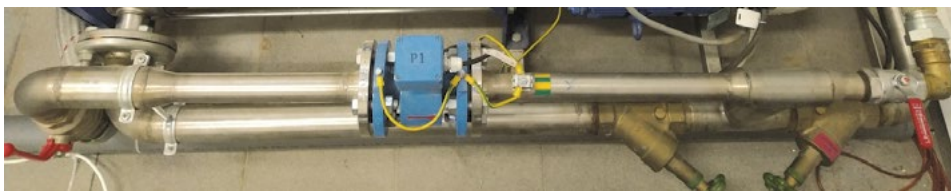
Indukční průtokoměr IP DN10 (Obr. 3) má měřicí rozsah průtoku od $0,016 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ do $0,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, viz kalibrační list [13]. Jedná se o mobilní průtokoměr vnitřního průměru 10 mm. Indukční průtokoměr IP DN10 byl ověřen porovnáním průtoků naměřených indukčním průtokoměrem s průtoky naměřenými objemovou a hmotnostní metodou. Maximální odchylka mezi průtoky naměřenými průtokoměrem a objemovou metodou činila 0,6 %. Odchylka měření průtoků průtokoměrem a hmotnostní metodou nepřesáhla 2 %.



Obr. 3 Indukční průtokoměr IP DN10.

- IP DN32

Indukční průtokoměr IP DN32 (Obr. 4) má měřicí rozsah průtoku od $0,33 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ do $3,36 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, viz kalibrační list [14]. Jedná se o stacionární průtokoměr vnitřního průměru 32 mm.



Obr. 4 Indukční průtokoměr IP DN32.

- IP DN50

Indukční průtokoměr IP DN50 (Obr. 5) má měřicí rozsah průtoku od $0,51 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ do $8,64 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, viz kalibrační list [15]. Jedná se o mobilní průtokoměr vnitřního průměru 50 mm. Vykazované hodnoty IP DN50 se v souhrnu neodchylovaly od ostatních metod v rámci nejistoty stanovení průtoku.



Obr. 5 Indukční průtokoměr IP DN50.

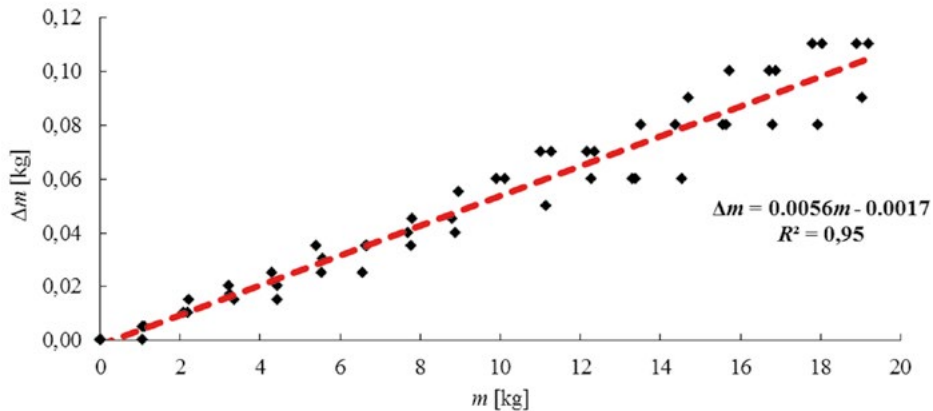
4 VÝSLEDKY

Hmotnostní metoda

Při měření váhou WeiHen (Obr. 2) byla zjištěna jednostranná odchylka měření hmotnosti zobrazená na Obr. 6. Odchylku měření hmotnosti Δm lze popsat regresním vztahem

$$\Delta m = 0,0056 \cdot m - 0,0017. \quad (4)$$

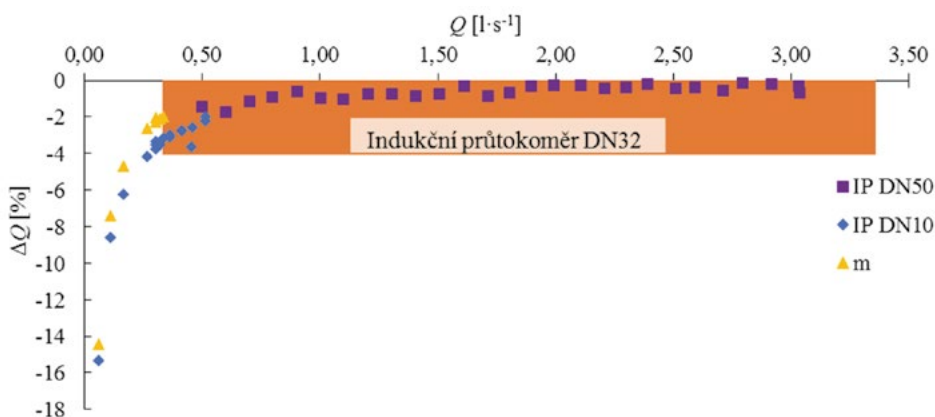
Při použití hmotnostní metody měření průtoku je nutné odchylku měření hmotnosti Δm odečíst od měřené hmotnosti m .



Obr. 6 Závislost odchylky měření hmotnosti váhou WeiHen na měřené hmotnosti.

Indukční průtokoměr

Indukční průtokoměr IP DN32 byl ověřen pomocí indukčních průtokoměrů IP DN10, IP DN50 a hmotnostní metody měření průtoku (Obr. 7). Vyhodnocením ověřovacích měření bylo zjištěno, že průtoky měřené průtokoměrem IP DN32 jsou jednostranně odchýlené. Jednostranná odchylka měření činí v celém rozsahu platnosti měřidla $+0,01 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Korekce průtoků měřených indukčním průtokoměrem se provede odečtením odchylky průtoku od průtoku měřeného IP DN32.



Obr. 7 Odchylka měření průtoku od indukčního průtokoměru IP DN32, m značí hmotnostní metodu.

5 DISKUZE

Z výsledků vzájemného porovnání metod měření průtoku byly identifikovány dvě metody, které vykazovaly jednostrannou odchylku měření průtoku. Jednalo se o hmotnostní metodu a metodu využívající indukční průtokoměr IP DN32. Příčinou jednostranné odchylky v případě hmotnostní metody byla systematická chyba váhy. Příčinou jednostranné odchylky v případě IP DN32 byla systematická chyba v určení proteklého objemu průtokoměrem. Pro dostatečně přesné měření průtoku v celém požadovaném rozsahu od $0,0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ až do $3,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ byly uvedené systematické chyby měřidel odstraněny použitím opravných funkcí. Opravné funkce odstranily nalezené systematické chyby, jejichž eliminací se významně zvětšila přesnost stanovení průtoku v celém požadovaném rozsahu průtoku.

6 ZÁVĚR

Identifikace a kvantifikace odchylek měření průtoku bude použita ke zkvalitnění výsledků výzkumu prováděného na experimentálních zařízeních využívajících uvedených metod měření průtoku. Dále byla potvrzena potřeba provádění kontrolních měření za účelem ověření správnosti použitých metod měření a měřidel.

Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory projektu FAST-J-20-6315 " Stanovení nejistot u vybraných hydraulických úloh".

Použité zdroje

- [1] THOMPSON, J. On experiments on the measurement of water by triangular notches in weir boards. In: British association for the advancement of science: Annual report. 31. London: John Murray, Albemarle street, 1861, s. 151.
- [2] BARR, J. Experiments upon the flow of water over triangular notches. Engineering. London, 1910, (89), 435.
- [3] CONE, V. M. Flow through weir notches with thin edges and full contractions. Journal of Agricultural Research. U.S. Department of Agriculture, 1916, (23), 1051.
- [4] YARNALL, D. R. The V-notch weir method of measurement. Am. Soc. Mech. Engineers Trans., 1912, (34), 1055.
- [5] YARNALL, D. R. Accuracy of the V-notch weir method of measurement. Am. Soc. Mech. Engineers Trans., 1926, (48), 939.
- [6] GREVE, F. W. Flow of water through circular, parabolic, and triangular vertical notch weirs. Eng.: Purdue Univ., 1932, 16(40), 84.
- [7] LENZ, A. T. Viscosity and surface tension effects on V-notch weir coefficients. Am. Soc. Mech. Engineers Trans., 1943, (108), 759.
- [8] SHEN, J. Discharge Characteristics of Triangular-notch Thin-plate Weirs. US Geological Survey Water Supply Paper 1617-B. 1981.
- [9] ČSN ISO 1438: Hydrometrie - Měření průtoku vody v otevřených korytech pomocí tenkostěnných přelivů. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [10] POSPÍŠILÍK, Šimon. Tenkostěnné přelivy s $2,67^\circ$ trojúhelníkovým výřezem. Brno, 2020. ISBN 978-80-86433-73-8.
- [11] ĎAĎO, S., L. BEJČEK a A. PLATIL. Měření průtoku a výšky hladin. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-156-X.
- [12] ČSN EN 24185+AC: Měření průtoku klapalin v uzavřených profilech, Vážicí metoda. Praha: Český normalizační institut, 1995.
- [13] Kalibrační list č. 080/2020
- [14] Kalibrační list č. 047/2018
- [15] Kalibrační list č. 114/2020

IDENTIFIKACE A KVANTIFIKACE NEJISTOT PŘI MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ SOUČINITELE PRŮTOKU TENKOSTĚNNÝCH PŘELIVŮ S TROJÚHELNÍKOVÝM VÝŘEZEM

IDENTIFICATION AND QUANTIFICATION OF UNCERTAINTIES IN THE MEASUREMENT AND EVALUATION OF THE DISCHARGE COEFFICIENT OF TRIANGULAR-NOTCH THIN-PLATE WEIR

Šimon Pospíšilík¹

¹ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb, Veverčí 331/95, 602 00 Brno, Česká republika.

Abstrakt

Stanovení součinitele průtoku tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem dle ČSN ISO 1438 je spojeno s řadou nejistot. Práce se zabývá identifikací a kvantifikací nejistot dle ČSN ISO 5168 a kvantifikací rozšířené bezrozměrné kombinované nejistoty součinitele průtoku přes tenkostěnné přelivy s trojúhelníkovými výřezy 2,67°; 5,03°; 10,03°; 15,04°; 20,04°; 25,06°; 30,07°; 60,18°.

Klíčová slova

Nejistota měření, přepad, součinitel průtoku, tenkostěnný přeliv s trojúhelníkovým výřezem

Abstract

Determination of the discharge coefficient of triangular-notch thin-plate weir according to ČSN ISO 1438 is associated with several uncertainties. The work deals with the identification and quantification of uncertainties according to ČSN ISO 5168 and quantification of the extended dimensionless combined uncertainty of the discharge coefficient of thin-plate weirs with a triangular notches 2.67°; 5.03°; 10.03°; 15.04°; 20.04°; 25.06°; 30.07°; 60.18°.

Key words

Measurement uncertainty, overflow, discharge coefficient, triangular-notch thin-plate weir

1 ÚVOD

Použití tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem pro měření průtoků je od počátku výzkumů spojeno s výskytem nejistot měření a jejich kvantifikací při zvoleném způsobu vyhodnocení. Díky práci řady autorů provedené ve 20. století a shrnuté v roce 1981 Shenem [1] bylo možné nejistoty měření na tenkostěnných přelivech s trojúhelníkovým výřezem pro způsob vyhodnocení založený na efektivní přepadové výšce definovat v ČSN ISO 1438 [2]. Nejistoty měření uvedené v ČSN ISO 1438 [2] jsou omezeny rozsahy velikosti úhlu výřezu (od 20° do 100°), přepadové výšky (minimálně 0,06 m), výšky přelivu (minimálně 0,09 m) a relativní výšky přelivu. Otázka identifikace a stanovení nejistot v oblastech mimo uvedené rozsahy nebyla doposud zodpovězena.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Identifikace a kvantifikace nejistot při měření a vyhodnocení součinitele průtoku tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem uvedená v ČSN ISO 1438 [2] vychází z ISO/IEC Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995) [3] a ISO/TS 25377 [4]. V současné době je v České republice vyjadřování nejistot založeno na Pokynu pro vyjadřování nejistot měření (2012) [5], který je překladem JCGM 100:2008 [3] a ČSN ISO 5168 [6].

3 METODIKA

Nejistoty vzniklé při stanovení součinitele průtoku tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem lze dle způsobu stanovení A, nebo B rozdělit na nejistoty typu A a B. Nejistota typu A je stanovena pomocí statistického vyhodnocení série měření, zatímco nejistota typu B se stanoví jinými než statistickými metodami, např. odborným odhadem, nebo je uvedena v kalibračním listu použitého měřicího přístroje. Kombinovaná nejistota představuje kombinaci nejistot A a B.

Stanovení nejistoty typu A

Nejistoty typu A byly stanoveny z datových řad metodikou uvedenou v ČSN ISO 1438 [2], kde standardní nejistota $u_A(x)$ jednotlivých měření sledované veličiny x je vyjádřena směrodatnou odchylkou. Pro vyjádření nejistoty vzniklé malým počtem měření n sledované veličiny x se do výpočtu standardní nejistoty $u_A(x)$ jednotlivých měření zavádí součinitel t_e [2]

$$u_A(x) = t_e \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (1)$$

Hodnota skutečného průměru \bar{x} sledované veličiny x se stanoví jako

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2)$$

V případech navázání nejistoty typu A na střední hodnotu sledované veličiny \bar{x} se nejistota střední hodnoty $u_A(\bar{x})$ stanoví jako [2]

$$u_A(\bar{x}) = \frac{t_e}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3)$$

Stanovení nejistoty typu B

Nejistoty typu B $u_B(x)$ byly stanoveny z udávaného rozsahu přesnosti použitých metod měření [6], nebo z rozšířené nejistoty $U(x)$ a koeficientu rozšíření k uvedených v kalibračních listech [9], [10], [11] použitých přístrojů vztahem

$$u_B(x) = \frac{U(x)}{k}. \quad (4)$$

Stanovení kombinované nejistoty

Odhad hodnoty kombinované nejistoty $u_C(x)$ sledované veličiny x byl určen jako součet čtverců nejistoty typu A a typu B ($j = A, B$) vztahem

$$u_C(x) = \sqrt{\sum_{j=A}^B [u_j(x)]^2}. \quad (5)$$

Převod nejistoty na bezrozměrný tvar

V případech navázání nejistoty na měřený rozměr byla nejistota převedena na bezrozměrný tvar $u^*(x)$ vztahem

$$u^*(x) = \frac{u(x)}{x}, \quad (6)$$

kde x představuje měřenou hodnotu a $u(x)$ rozměrový tvar nejistoty.

Zdroje nejistot součinitele průtoku

Součinitel průtoku C_d je definován modifikovaným Kindsvater–Shenovým vztahem [1], který používá přepadovou výšku namísto účinné přepadové výšky

$$C_d = \frac{Q}{\frac{8}{15} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot (2 \cdot g)^{1/2} \cdot h^{5/2}}, \quad (7)$$

ze kterého vyplývají nejistoty stanovení průtoku Q , úhlu výřezu α a přepadové výšky h . Pro hodnotu tíhového zrychlení g se nejistota neuvažuje, protože se jedná o smlouvanou konstantu. Na základě modifikovaného Kindsvater–Shenova vztahu (7) lze poté vyjádřit z jednotlivých vstupních bezrozměrných kombinovaných nejistot $u_C^*(x)$ kombinovanou nejistotu součinitele průtoku $u_C^*(C_d)$

$$u_C^*(C_d) = \sqrt{[u_C^*(Q)]^2 + \left[u_C^*\left(\tan \frac{\alpha}{2}\right)\right]^2 + \left[\frac{5}{2} u_C^*(h)\right]^2}. \quad (8)$$

Rozšířená bezrozměrná kombinovaná nejistota součinitele průtoku $U_C^*(C_d)$, která odpovídá 95% překryvu normálního rozdělení (95% konfidenční úroveň) se vypočítá pro koeficient rozšíření $k = 2$ vztahem

$$U_C^*(C_d) = k \cdot u_C^*(C_d). \quad (9)$$

Nejistota stanovení průtoku

Pro stanovení průtoku vody přepadající přes tenkostěnný přeliv byly použity tři metody z důvodu omezení rozsahu použitelnosti jednotlivých metod. Pro ověření použitelnosti jednotlivých metod stanovení průtoku byly jednotlivé metody použity s překryvem.

- Indukční průtokoměry

Bezrozměrná nejistota stanovení průtoku Q_{IP} pomocí indukčních průtokoměrů byla stanovena jako kombinace bezrozměrné nejistoty měření času $u_C^*(t)$ (uvedeno níže) a třídy přesnosti použitých průtokoměrů dle vztahu (5). Kalibrační listy použitých průtokoměrů udávají rozšířenou bezrozměrnou nejistotu měření $U_B^*(Q_{IP}) < 2\%$. Bezrozměrná standardní nejistota průtoku $u_B^*(Q_{IP})$ stanoveného indukčními průtokoměry vychází ze vztahu (4) modifikovaného pro stanovení nejistoty typu B jako

$$u_B^*(Q_{IP}) = \frac{U_B^*(Q_{IP})}{k}. \quad (10)$$

- Hmotnostní metoda

Nejistota stanovení průtoku Q_m pomocí hmotnostní metody popsané v [7] je založena na vztahu

$$Q_m = \frac{m}{t \cdot \rho}. \quad (11)$$

Bezrozměrná nejistota stanovení průtoku hmotnostní metodou $u_C^*(Q_m)$ byla definována jako

$$u_C^*(Q_m) = \sqrt{[u_C^*(m)]^2 + [u_C^*(t)]^2}, \quad (12)$$

kde $u_C^*(m)$ reprezentuje bezrozměrnou kombinovanou nejistotu měření hmotnosti m a $u_C^*(t)$ představuje bezrozměrnou kombinovanou nejistotu měření času t . Nejistota reprezentující vliv hustoty ρ nebyla kvantifikována, byla uvažovaná jako smlouvaná dle [8]. Hustota vody byla určena pomocí závislosti hustoty na teplotě vody [8]. Pro měření teploty byl použit digitální teploměr s dělením 0,1 °C.

- Objemová metoda

Nejistota stanovení průtoku Q_V pomocí objemové metody je založena na vztahu

$$Q_V = \frac{V}{t}. \quad (13)$$

Bezrozměrná nejistota objemové metody měření průtoku $u_C^*(Q_V)$ je tedy definována jako

$$u_C^*(Q_V) = \sqrt{[u_C^*(V)]^2 + [u_C^*(t)]^2}, \quad (14)$$

kde $u_C^*(V)$ reprezentuje bezrozměrnou kombinovanou nejistotu měření objemu V a $u_C^*(t)$ představuje bezrozměrnou kombinovanou nejistotu měření času t .

Nejistota stanovení velikosti úhlu výřezu

Nejistota stanovení velikosti úhlu výřezu pomocí dvouválcové metody popsané v [7] se stanoví na základě vztahu

$$\alpha = 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{\bar{d}_2 - \bar{d}_1}{2 \cdot a_2 + \bar{d}_1 - \bar{d}_2} \right), \quad (15)$$

pro který se stanoví bezrozměrné kombinované nejistoty rozměru válců $u_C^*(d_i)$ a svislé odlehlosti vrcholů válců $u_C^*(a_2)$, kde \bar{d}_i jsou střední hodnoty průměru vkládaných válců a a_2 je svislá odlehlost vrcholů válců. Trojúhelníkové výřezy jsou tedy zatíženy bezrozměrnou kombinovanou nejistotou $u_C^*(\text{tg}(\alpha/2))$.

Bezrozměrné kombinované nejistoty průměru válců $u_C^*(d_i)$ se stanoví pomocí vztahů (5) a (6), do kterých vstupuje nejistota typu A $u_A(\bar{d}_i)$, nejistota typu B $u_B(d_i)$ a střední hodnota průměru válce \bar{d}_i . Nejistota průměru válců typu A se stanoví použitím vztahu (2) a (3). Nejistota průměru válců typu B se stanoví z rozšířené nejistoty posuvného měřidla $U_B(h)$ dosazením do vztahu (4).

Bezrozměrná kombinovaná nejistota svislé odlehlosti vrcholů válců $u_C^*(a_2)$ odpovídá bezrozměrné kombinované nejistotě hrotového měřidla $u_C^*(h_m)$.

Nejistota stanovení přepadové výšky

Pro měření úrovně hladiny vody přepadající přes tenkostěnný přeliv s trojúhelníkovým výřezem bylo použito hrotové měřidlo.

Nejistota typu A hrotového měřidla byla stanovena opakovaným měřením ustálené hladiny vody a dosazením do vztahů (1) a (2).

Hrotové měřidlo bylo s dělením po 0,01 mm. Nejistota typu B hrotového měřidla byla odhadnuta jako polovina dělení hrotového měřidla na $u_B(h) = 0,005$ mm.

Bezrozměrná kombinovaná nejistota hrotového měřidla $u_C^*(h_m)$ byla určena dosazením nejistot typu A $u_A(h)$ a typu B $u_B(h)$ do vztahu

$$u_C^*(h_m) = \frac{\sqrt{[u_A(h)]^2 + [u_B(h)]^2}}{h}, \quad (16)$$

kde h představuje hodnotu naměřené přepadové výšky.

Bezrozměrná kombinovaná nejistota stanovení přepadové výšky $u_C^*(h)$ se stanoví jako

$$u_C^*(h) = \sqrt{[u_C^*(h_m)]^2 + [u_C^*(h_0)]^2}, \quad (17)$$

kde nejistota referenční nuly výřezu $u_C^*(h_0)$ je určena z bezrozměrné kombinované nejistoty úhlu výřezu $u_C^*(\text{tg}(\alpha/2))$ a bezrozměrné kombinované nejistoty průměru válců $u_C^*(d_i)$ vztahem (5).

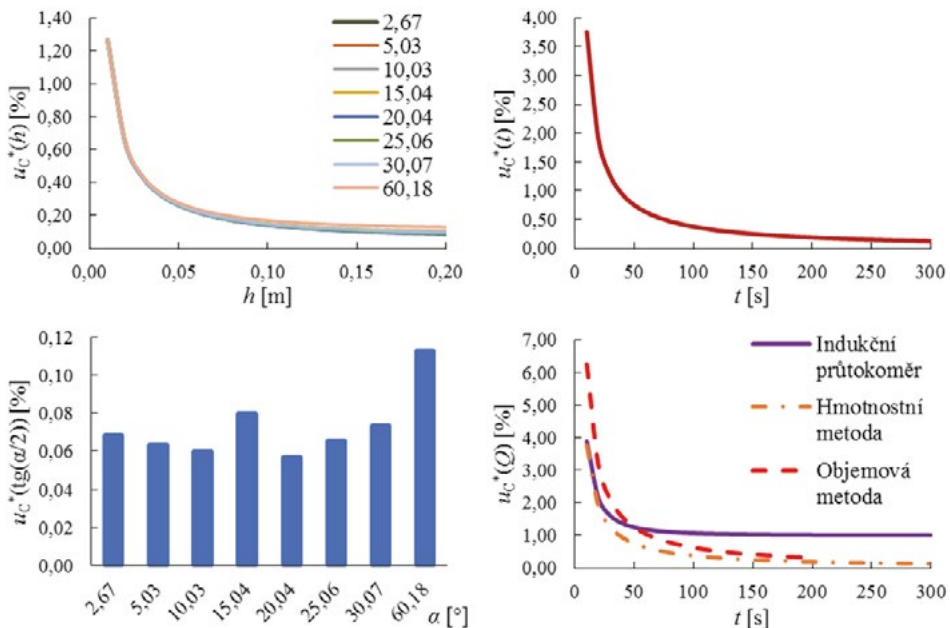
Nejistota měření času

Pro měření času byly použity digitální stopky s přesností odečtu na 0,01 s. Průměrná doba reakce Δt při měření času t byla stanovena na 0,38 s. Vzhledem k tomu, že doba reakce u měření času je několikanásobně delší než přesnost digitálních stopek, byla bezrozměrná nejistota měření času $u_C^*(t)$ stanovena jako

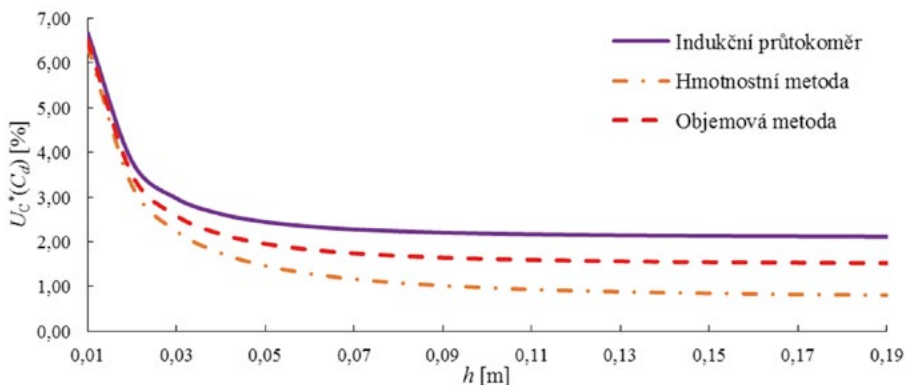
$$u_C^*(t) = \frac{\Delta t}{t}. \quad (18)$$

4 VÝSLEDKY

Obr. 1 znázorňuje jednotlivé bezrozměrné kombinované nejistoty veličin uvedených ve vztahu (8) a času převedených na procenta v závislosti na měřené veličině pro určení bezrozměrné kombinované nejistoty součinitele průtoku tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovými výřezy. Jedná se o procentuální závislost bezrozměrné kombinované nejistoty přepadové výšky $u_C^*(h)$ na měřených hodnotách přepadové výšky h , o procentuální závislost bezrozměrné kombinované nejistoty $u_C^*(\text{tg}(\alpha/2))$ na úhlech výřezu 2,67°; 5,03°; 10,03°; 15,04°; 20,04°; 25,06°; 30,07°; 60,18° a o procentuální závislost bezrozměrné kombinované nejistoty průtoku stanoveného indukčními průtokoměry $u_C^*(Q_{IP})$, hmotnostní metodou $u_C^*(Q_m)$ a objemovou metodou $u_C^*(Q_V)$ na měřeném čase t . Z důvodu určení vlivu měření času na stanovení průtoku popsány metodami měření (Indukční průtokoměr, Hmotnostní metoda, Objemová metoda) je uvedena i procentuální závislost bezrozměrné kombinované nejistoty času $u_C^*(t)$ na měřené době t .



Obr. 1 Bezrozměrné kombinované nejistoty vstupů pro určení bezrozměrné kombinované nejistoty součinitele průtoku.



Obr. 2 Závislost rozšířené bezrozměrné kombinované nejistoty součinitele průtoku na přepadové výšce.

Na Obr. 2 je uvedena závislost rozšířené bezrozměrné kombinované nejistoty součinitele průtoku na přepadové výšce pro úhel výřezu tenkostěnného přelivu $60,18^\circ$. Úhel výřezu $60,18^\circ$ reprezentuje maximální hodnoty závislosti rozšířené bezrozměrné kombinované nejistoty na přepadové výšce. Maximální rozdíl mezi $U_C^*(C_d)$ indukčních průtokoměrů pro všechny úhly výřezu činil 0,066 %, maximální rozdíl mezi $U_C^*(C_d)$ hmotnostní metody činil 0,193 % a maximální rozdíl mezi $U_C^*(C_d)$ objemové metody činil 0,092 %.

5 DISKUZE

Ze závislosti rozšířené bezrozměrné kombinované nejistoty součinitele průtoku $U_C^*(C_d)$ na přepadové výšce uvedené na Obr. 2 je patrné, že nejistota stanoveného součinitele průtoku výrazně stoupá ze snižující se hodnotou přepadové výšky h . Zmíněný nárůst nejistoty stanovení součinitele průtoku je především způsoben vlivem kombinované nejistoty určení přepadové výšky dle Obr. 1.

Dále je z Obr. 2 patrné, že metoda stanovení průtoku indukčním průtokoměrem má největší vliv na nejistotu při stanovení součinitele průtoku z použitých metod měření průtoku. Pro nižší hodnoty přepadové výšky je tedy vhodné použít hmotnostní a objemovou metodu stanovení průtoku.

6 ZÁVĚR

Stanovení nejistot zatěžujících hodnotu součinitele průtoku u tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem je dle Obr. 2 limitně omezen především metodami měření průtoku a určením hodnoty přepadové výšky viz Obr. 1. Dle ČSN ISO 1438 [2] je minimální hodnota přepadové výšky na tenkostěnném přelivu s trojúhelníkovým výřezem 0,06 m. Dle výsledků stanovení rozšířené bezrozměrné kombinované nejistoty součinitele průtoku by bylo možné za podmínky zanedbání nejistot vlivu viskozity a povrchového napětí posunout hranici použití tenkostěnných přelivů s trojúhelníkovým výřezem až k hodnotám přepadové výšky 0,03 m. Pro hodnoty přepadové výšky nižší než 0,03 m dochází dle Obr. 2 k exponenciálnímu nárůstu nejistoty stanovení součinitele průtoku nad hodnotu rozšířené kombinované nejistoty 2,0 % zapříčiněný kombinovanou nejistotou určení přepadové výšky uvedenou na Obr. 1.

Poděkování

Príspevek vznikl za podpory projektu FAST-J-20-6315 " Stanovení nejistot u vybraných hydraulických úloh".

Použité zdroje

- [1] SHEN, J. Discharge Characteristics of Triangular-notch Thin-plate Weirs. US Geological Survey Water Supply Paper 1617-B. 1981.
- [2] ČSN ISO 1438: Hydrometrie - Měření průtoku vody v otevřených korytech pomocí tenkostěnných přelivů. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [3] JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, 2008
- [4] ISO/TS 25377:2007 Hydrometric uncertainty guidance (HUG). 2007
- [5] Pokyn pro vyjadřování nejistot měření (GUM). Sborník technické harmonizace. ÚNMZ, 2012
- [6] ČSN ISO 5168: Měření průtoku tekutin - Postupy pro vyhodnocení nejistot. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [7] POSPÍŠILÍK, Šimon. Tenkostěnné přelivy s $2,67^\circ$ trojúhelníkovým výřezem. Brno, 2020. ISBN 978-80-86433-73-8.
- [8] ČSN EN 24185+AC: Měření průtoku klapalin v uzavřených profilech, Vážicí metoda. Praha: Český normalizační institut, 1995.
- [9] Kalibrační list č. 080/2020
- [10] Kalibrační list č. 047/2018
- [11] Kalibrační list č. 114/2020

6.

Stavebně materiálové inženýrství

Building Materials and Components

DOPAD JEMNOSTI MLETIA VÁPENCŮV NA ICH REAKTIVITU

THE IMPACT OF THE FINENESS OF LIMESTONES ON THEIR REACTIVITY

Simona Ravaszová^{*1}, Karel Dvořák¹

^{*}ravaszova.s@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

V procese odsírenia spalín sa v značnej miere používajú vápence najmä vďaka ich schopnosti tvoriť zlúčeniny síry. K príprave vápencovej suspenzie k vypieraniu spalín sa používa vápenc s obsahom uhličitanu vápenatého CaCO_3 90 až 95 %. Je veľmi dôležité skúmať rôzne vlastnosti suroviny pre lepšie pochopenie procesu odsírenia a takisto dopadu na ekonomickú stránku tohto procesu. Tento článok predstavuje štúdiu o reaktivite vápencov, ktorá je meraná prostredníctvom metódy Bischof-Uhde. Sleduje vlastnosti súboru českých vápencov, a to dopad jemnosti mletia týchto vápencov na ich reaktivitu.

Klíčov^á slova

Vápenc, reaktivita, metóda Bischof-Uhde

Abstract

Limestone is used in the flue gas desulphurization process due to its ability to form sulfur compounds. Different qualities of limestone absorbents can be used in the process and it is therefore important to measure the reactivity of these materials. A limestone with a 90 to 95 % of calcium carbonate is used to prepare limestone slurry for the flue gas desulphurization. It is very important to explore the different properties of the raw material for a better understanding of the desulphurization process and also the impact on the economic aspect of the process. This article presents a study about limestones reactivity, which is measured by the Bischof-Uhde method. The study monitors the impact of the milling of set of Czech limestones on their reactivity.

Key words

Limestone, reactivity, Bischof-Uhde method

1 ÚVOD

V súčasnej dobe je téma životného prostredia a ekológie veľmi diskutovaná. Najmä tlak európskej únie prispieva k návrhom nových zariadení a tvorbe vyhlášok, ktoré sprisňujú emisné limity látok znečisťujúcich životné prostredie.

Energetický priemysel patrí medzi odvetvia s obrovským dopadom na životné prostredie. Zásadnú úlohu v energetike hrajú fosílna palivá vďaka ich dobrej dostupnosti a teda prijateľnej cene. Jedná sa o palivá obsahujúce síru v rôznom množstve či podobe. Pri spaľovaní týchto palív vznikajú oxidy síry, z ktorých najväčšiu časť tvorí oxid siričitý. Množstvo síry v palive má teda zásadný vplyv na koncentráciu oxidu siričitého v spalínach [1], [2], [3], [4].

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Stúpajúca úroveň znečistenia ovzdušia viedla k sledovaniu emisií škodlivých látok. Táto problematika sa stala obzvlášť významná pre jej negatívny dopad na globálne klimatické zmeny. Oxid siričitý patrí medzi hlavných ukazateľov znečistenia ovzdušia. Pre zníženie množstva škodlivých exhalátov z elektrární na fosílna palivá sa používajú najrôznejšie metódy a postupy. Tie spočívajú v úpravách spaľovacieho procesu smerujúcich

k minimalizácii vzniku nežiaducich škodlivín a v znižovaní obsahu znečisťujúcich látok v spalinách uplatnením vhodných odľučovacích metód.

V priemyslovo rozvinutých krajinách sú stanovené maximálne emisné limity regulujúce množstvo emisií vypúšťaných do ovzdušia, ktorým sa v súčasnosti predchádza pomocou rôznych metód odsírenia. Pre odľučovanie SO_2 sa v priebehu rokov presadila najmä mokrá vápencová vypierka s možnosťou uplatnenia sadrovca, ako produktu. K príprave vápencovej suspenzie k vypieraniu spalín sa používa vápenc s obsahom uhličitanu vápenatého CaCO_3 90 až 95 %. Princípom odsírenia je vypieranie plynného oxidu siričitého (SO_2) obsiahnutého v spalinách vodnou vápencovou suspenziou za vzniku roztoku hydrogensiričitanu vápenatého. Hydrogensiričitan vápenatý je pomerne dobre rozpustná soľ, ktorú je možné ľahko oxidovať v odsirovacom zariadení a tak získať dihydrát síranu vápenatého, zvaného aj energosádrovec.

Najčastejšie používaným sorbentom je teda vápenc. Náklady na sorbent podstatne ovplyvňujú náklady na odsirovacie zariadenie, a preto je nutné dôsledne voliť typ použitého sorbentu. Účinnosť odsírenia teda závisí na vlastnostiach a reaktivite vápenca. Je nutné definovať požiadavky na kvalitu, najmä na chemickú čistotu, meliteľnosť, granulometriu, genéziu, porozitu a reaktivitu vápenca. Vápenc by mal byť čo najčistejší, pretože chemická reaktivita prebieha výhradne medzi CaO a SO_2 . Ostatné látky obsiahnuté vo vápenci sú nežiaduce s výnimkou MgCO_3 , ktorý s SO_2 reaguje ale iba v malej miere.

Vápenc by mal byť čo najlepšie meliteľný, pretože horšie meliteľné vápence zvyšujú náklady na mletie. Veľkosť častíc vápenca je nepriamo úmerná povrchu. Čím je veľkosť častíc vápenca menšia, tým je povrch väčší a účinnosť odsírenia vyššia. Reaktivita je ukazateľ udávajúci koľko percent sorbentu reaguje s SO_2 [5], [6]. Pre nižšie popísaný experiment boli vybrané 4 druhy českých vápencov. Cieľom bolo analyzovať vplyvy, ktoré ovplyvňujú reaktivitu vápencov, a to v procese viazania sa na zlúčeniny síry pri odsírení plynov tepelných procesov. Článok je slovenským prekladom článku The relation of limestone origin and its reactivity to the preparation of desulphurization agents vydaný v rámci Binders, Materials and Technologies in Modern Construction IV. Solid State Phenomena. Switzerland: Trans Tech Publications.

3 METODIKA

Súbor reprezentujú 4 české vápence z rôznych lokalít Českej republiky, ktoré vznikli v období devónu/siluru s rozdielnym obsahom CaCO_3 , ktoré boli upravené na 3 rôzne merné povrchy.

Vzorky českých vápencov boli upravené mletím na merné povrchy 4000, 4500 a 5000 cm^2/g . Pre dosiahnutie týchto merných povrchov bol použitý vibračný diskový mlyn RS 200 od firmy RETSCH. Princíp mletia spočíva v kruhových horizontálnych vibráciách, ktoré pôsobením na mlecie telesá vyvolávajú odstredivú silu, dôsledkom ktorej je materiál mletý nárazom, tlakom a trením. Bola vybraná mlecia kapsula o objeme vnútornej nádoby 100 ml s mlecími telesami z nerezovej ocele – valcom a prstencom. Režim mletia bol volený ako kombinácia otáčok a mlecieho času mlyna na základe kontroly merného povrchu metódou Blaine a BET.

Merný povrch Blaine sa meral pomocou automatického zariadenia PC-Blaine-Star s kapacitou 7,95 cm^3 . Meranie bolo vykonané trikrát, aby sa vylúčili chyby, a výsledná hodnota bola priemerom z troch meraní [7]. Pórovitosť vápencov sa stanovila pomocou grafov adsorpcie / desorpcie N_2 . Plochy povrchu boli vypočítané z izotermických údajov pomocou metódy (BET). Celkový objem pórov a mikropórov vzoriek sa vypočítal pomocou analýzy t-grafu. Na získanie kriviek distribúcie veľkosti pórov bola použitá metóda Barrett-Joyner-Halenda (BJH).

Chemické stanovenie množstva oxidu vápenatého a oxidu horečnatého vo vzorke sa uskutočnilo navážením 500 mg vzorky vápenca, ku ktorej bolo pridaných 5 ml koncentrovanej HCl. Takto pripravený roztok sa uviedol k varu. Po vychladnutí sa doplnil destilovanou vodou. Suma CaO a MgO sa stanovila chelatometricky (titráciou roztokom Chelatonu 3).

Množstvo MgO sa stanovilo prostredníctvom atómovej absorpčnej spektroskopie a množstvo CaO sa vypočítalo ako rozdiel sumy CaO a MgO a množstva MgO . Na základe takto získaných hodnôt CaO a MgO bolo vypočítané množstvo CaCO_3 a MgCO_3 vo vzorke vápenca.

Na stanovenie reaktivity vápencov bola zvolená metóda Bischof-Uhde. Pre túto metódu je veľmi dôležitá vstupná granulometria. Testovaný vápenc musí obsahovať najmenej 85 % zrn menších ako 32 μm . Následne sa do titračnej nádoby vložilo magnetické miešadlo, vsypalo sa 0,5 g vzorky vápenca a prilialo sa 200 ml destilovanej vody. Magnetická miešačka sa uviedla do prevádzky. Stanovenie sa uskutočnilo pri teplote 20 °C. Po ustálení teploty a pH sa do suspenzie pridalo také množstvo kyseliny chlorovodíkovej, aby hodnota pH klesla na 4,0. Postupným pridávaním kyseliny sa pH udržovalo stále na tejto hodnote. Po 5 minútach pridávania kyseliny sa odčítala jej spotreba a skúška sa ukončila.

Zo spotreby kyseliny po 5 minútach sa vypočítalo množstvo zreagovaného vápenca. Výsledok sa uvádza v % pôvodného obsahu CaCO_3 v testovanej vzorke sorbentu.

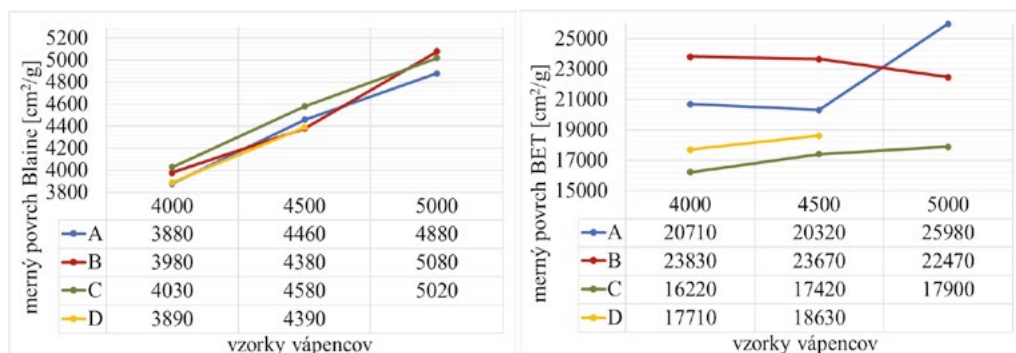
4 VÝSLEDKY

Pre experiment boli zvolené 4 druhy vápencov zo 4 lokalít Českej republiky, ktorých klasifikácia je uvedená v Tab. 1.

Tab. 1 Klasifikácia vápencov – vek, chemické zloženie a klasifikácia podľa Dunham.

	Geologický vek	Odhad [mil. rokov]	CaCO ₃
A	devón	389	93
B	devón	389	98
C	ordovik/silúr	443	90
D	devón	389	98

Merný povrch týchto vápencov meraný prostredníctvom Blaine a BET je uvedený na Obr. 1.

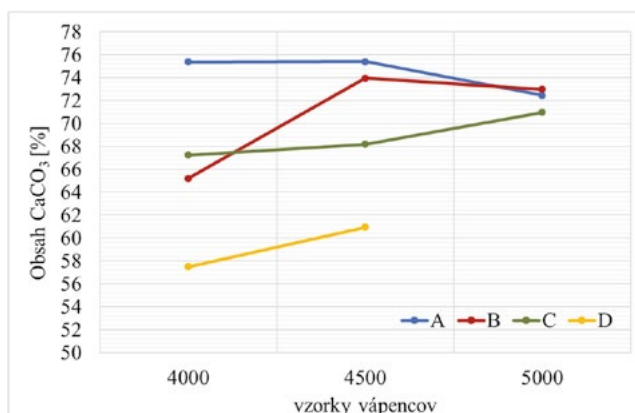


Obr. 1 Grafické znázornenie merných povrchov meraných prostredníctvom metódy Blaine a BET.

Výsledok stanovenia reaktivity českých vápencov je uvedený v poslednom stĺpci nasledujúcej Tab. 2. Rovnako je dôležité aj množstvo zreagovaného CaCO₃ vzťahnutý k navážke 0,5 uvedený v druhom stĺpci Tab. 2.

Tab. 2 Namerané hodnoty reaktivity vápencov.

	1M HCl [ml]	CaCO ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]	CaCO ₃ [%]	MgCO ₃ [%]	Výsledný obsah CaCO ₃ [%]
A/4000	6,63	69,85	51,92	0,57	92,67	1,19	75,38
A/4500	6,71	70,63	52,52	0,57	93,74	1,19	75,41
A/5000	6,37	67,11	51,92	0,54	92,67	1,13	72,45
B/4000	6,60	63,85	54,84	0,38	97,88	0,79	65,21
B/4500	6,87	72,39	54,84	0,37	97,88	0,77	73,95
B/5000	6,79	71,49	54,92	0,37	98,02	0,77	72,97
C/4000	5,69	59,88	49,92	1,60	89,10	3,35	67,23
C/4500	5,75	60,57	49,74	1,68	88,78	3,51	68,20
C/5000	6,26	65,95	52,04	1,25	92,88	2,62	70,97
D/4000	5,29	55,73	54,28	0,37	96,88	0,77	57,50
D/4500	5,68	59,84	54,96	0,39	98,08	0,82	60,95



Obr. 2 Grafické znázornenie reaktivity vápencov.

Na základe výsledkov uvedených v tabuľke vyplýva, že všetky typy vápencov pre všetky jemnosti mletia sú použiteľné ako desulfatačné činidlo. Z výsledkov reaktivity je zrejмый vplyv jemnosti mletia vzoriek. U vzoriek A a B predpokladáme pri vyšších jemnostiach mletia aglomeráciu častíc.

5 DISKUSIA

Vápenec C obsahuje 89-93 % CaCO₃ a približne 3-3,5 % MgCO₃. Pri jemnosti mletia v rozsahu 4000–4500 cm²/g zreagovalo z 0,5 g navážky vzorky približne 60 % hmotnosti. Pri prepočte na hodnotu zreagovaného CaCO₃ k celkovému CaCO₃ dosahujú tieto vzorky hodnoty 67 až 70 %. Je treba podotknúť, že metóda Bischof-Uhde je navrhnutá tak, aby prítomný MgCO₃ v podstate do reakcie nevstupoval. Vápenec D dosahuje vysokú čistotu čo sa obsahu CaCO₃ týka, a to až 98 %. So vzorkami C je porovnateľná vzorka D/4500, ktorá bola pomletá na približne rovnakú granulometriu. Pri tejto jemnosti mletia zreagovalo z 0,5 g navážky vzorky rovnako 60 % hmotnosti. Vzhľadom k vyššej čistote dosahovala táto vzorka pri prepočte na hodnotu zreagovaného CaCO₃ k celkovému CaCO₃ iba hodnoty 61 %. Vzorky vápencov B s čistotou 98 % a A s čistotou 93 % dosahovali hodnoty reaktivity približne 73 % respektíve 75 %. Mierne reaktívnejšia bola vzorka A ale pri nižšej čistote ako vzorka B. Takže celkové zreagované množstvo navážky je v oboch prípadoch veľmi podobné okolo 70 %. Z pohľadu celkového merného povrchu vrátane vnútorných pórov meraného pomocou metódy BET možno konštatovať, že vzorky C i D majú veľmi podobný celkový merný povrch, kedy D má pri rovnakej jemnosti mletia povrch mierne vyšší. Rozdiely ale nie sú natoľko významné, aby mohli výrazne ovplyvniť výsledok skúšky reaktivity. V prípade výsledkov B a A je celkový merný povrch výrazne vyšší ako u vzoriek C a D. Tomu odpovedá aj výrazne vyššia reaktivita. Výsledky merného povrchu meraného metódou BET vzťahujúce k výsledkom reaktivity naznačujú, že vnútorný povrch a s tým súvisiaci pórový systém má istý vplyv na reaktivitu vzoriek, avšak jemnosť mletia je z pohľadu meranej reaktivity významnejším faktorom. Zároveň je treba dodať, že v prípade vzoriek A a B sa jedná o mäkkšie vápence, u ktorých sa pri vyššej jemnosti mletia predpokladá aglomerácia častíc. Metóda Bischof-Uhde bola zvolená pre svoju časovú nenáročnosť a nízke nároky na vybavenie. Pre rozpúšťanie uhličitanu vápenatého bola použitá kyselina chlorovodíková, ktorá sa však v procese desulfatácie nevyskytuje. Preto v nadväzujúcom výskume sa doporučuje sledovať reaktivita vápencov vo vzťahu k reakcii s H₂SO₄, H₂SO₃ a HNO₃.

6 ZÁVER

Metóda stanovenia merného povrchu podľa Blaine je dostatočne kontrolným mechanizmom, ktorý poskytuje relevantné výsledky. Čím vyšší merný povrch tým väčšia reaktivita vápencov. Na základe dosiahnutých výsledkov možno konštatovať, že doporučený merný povrch pre dané typy českých vápencov pre zaistenie dostatočnej reaktivity v procese odsírenia je v rozmedzí 4000 až 4500 cm²/g podľa Blaine, pri vyššej jemnosti mletia dochádza u mäkkších vápencov k aglomerácii. Minimálna požadovaná reaktivita vápenca na odsírenie je 50 %, najväčší vplyv na reaktivitu vápencov v procese odsírenia bude teda mať obsah uhličitanu vápenatého vo vzorke a merný povrch vápenca.

Pod'akovanie

Tento výskum je financovaný z projektu číslo: FAST-J-20-6257: "Studium laboratorní přípravy, struktury a stability trikalciium silikátu".

Použité zdroje

- [1] BLASIO, Cataldo De, Ermei MÁKILÄ a Tapio WESTERLUND. Use of carbonate rocks for flue gas desulfurization: Reactive dissolution of limestone particles
- [2] McConville A. Emission Standards Handbook. IEACR/96 IEA Coal research, London; 1997
- [3] Kiil S. Experimental and theoretical investigations of Wet Flue Gas Desulfurization
- [4] HOŞTEN, Ç. a M. GÜLSÜN. Reactivity of limestones from different sources in Turkey
- [5] HLINCIK, T., a P. BURYAN. Evaluation of limestones for the purposes of desulphurisation during the fluid combustion of brown coal
- [6] Ukawa, N., Takashina, T., Shinoda, N., Shimizu, T. Effects of particle size distribution on limestone dissolution in wet FGD process applications
- [7] ČSN EN 196-6 Methods of testing cement – Part 6: Determination of Fineness

VLIV TYPU VÁPENCE NA ROZKLAD UHLIČITANU VÁPENATÉHO A NÁSLEDNOU KRYSTALIZACI OXIDU VÁPENATÉHO

INFLUENCE OF LIMESTONE TYPE ON DECOMPOSITION OF CALCIUM CARBONATE AND SUBSEQUENT CRYSTALLIZATION OF CALCIUM OXIDE

Dorothea Sklenářová^{*1}, Karel Dvořák¹

^{*}sklenarova.d@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veverí 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Tato studie se zabývá analýzou procesu rozkladu CaCO_3 a krystalizací CaO . Cílem práce je porovnání chování jednotlivých vzorků vápenců a změn v jejich mikrostruktuře, přičemž zkoumané vápence se liší svým geologickým stářím, původem a porozitou. K analýze vzorků byla použita vysokoteplotní rentgenová difrakční analýza. Během procesu výpalu byla sledována změna velikosti krystalitů a na základě měření bylo zjištěno rozdílné chování a vlastnosti některých vzorků. Další část tohoto výzkumu byla zaměřena na studium rozdílných teplot rozkladu CaCO_3 a vzniku CaO u poréznicích a rekrystalizovaných vápenců.

Klíčová slova

Vápenec, vápno, krystalit, vysokoteplotní rentgenová difrakční analýza (HT-XRD analýza), Scherrerova rovnice

Abstract

This study deals with the analysis of the process of decomposition CaCO_3 and crystallization of CaO . The aim of this work is to compare behaviour and microstructure changes between different limestone samples, that vary in geological age and origin, hardness category or total porosity. A high-temperature X-ray diffraction was used for sample analysis. During the firing process, the growth of crystallites was measured and computed. In these properties, the different behaviour of several samples was observed. Further analysis studied different temperatures of the end of CaCO_3 decomposition and the beginning of CaO formation in porous and recrystallized limestones.

Key words

Limestone, lime, crystallite, high-temperature X-ray diffraction (HT-XRD), Scherrer equation

1 ÚVOD

Vápence a vápno jsou v dnešní době materiálem používaným v mnoha průmyslových odvětvích. Jakožto nedílná součást produkce portlandského cementu se vápence podílí na tvorbě hlavních slínkových minerálů. V ocelářském průmyslu je pak vápno používáno jako hlavní struskotvorný materiál.

Za posledních 70 let byly vypracovány mnohé studie, které se věnovali rozdílným vlastnostem vápenců, jejich chování během výpalu a následným vlivem na vznik nového produktu, vápna [1], [2], [3]. Bylo pozorováno, že dva vápence stejného geologického stáří, způsobu geneze a diagenese mají rozdílné vlastnosti a chování během výpalu. Zajímavostí je, že v některých případech tyto rozdílné vlastnosti byly pozorovány i u nově vzniklého produktu, vápna, a to i když byly zachovány naprosto stejné podmínky výpalu. Tento jev je například možné sledovat i v případě dvou vzorků vápenců ze stejné lokality. Tato problematika byla až doposud hlavním předmětem výzkumu jen několika málo vědeckých skupin [4], [5], a to i přes to, že vlastnosti vápenných produktů jsou zcela zásadní pro jejich využití v mnohých průmyslových odvětvích.

Hlavní částí přeměny vápence na volné vápno je dekompozice CaCO_3 [6], [7]. Tento výzkum se věnuje sledování velikosti a rychlosti růstu krystalitů CaO . Za krystalit lze považovat množství buněk s krystalickou strukturou, které jsou systematicky spojeny a vytvářejí tak koherentně difrakční doménu. Jedná se o součást hmoty se spojitou pravidelnou strukturou. Krystal, vytvořený pouze jedním krystalitem, se nazývá monokrystal, kdežto polykrystal je tvořen více krystality, které mohou mít různé uspořádání [8], [9], [10].

Na základě XRD analýzy lze pozorovat změny šíře difrakčních píků. To je ovlivněno změnou velikosti krystalitů a lze ji stanovit měřením jednotlivých píků v polovině jejich výšky (Full peak width at half maximum height – FWHM). Tato metoda je založena na Scherrerově rovnici.

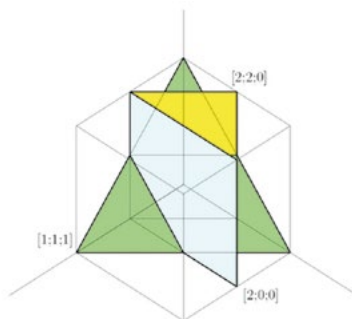
2 POUŽITÝ MATERIÁL A METODIKA

V rámci tohoto výzkumu byla sestavena sada 26 rozdílných druhů vápenců pocházejících z různých zemí světa. Liší se svým geologickým stářím (83–677 mil. let), způsobem vzniku - geologickým původem a porozitou. Jejich společným rysem je velmi vysoká čistota, kde obsah uhličitánů všech vzorků přesahuje 98 % a výsledky analýz tak nejsou ovlivňovány nečistotami obsaženými ve zkoumaných vápencích. Pro demonstraci dosažených výsledků byly vybrány dva vzorky. Vzorek A je zástupcem měkkých, pórovitých vápenců a vzorek B je vzorek rekrystalizovaný s nízkou porozitou.

Pro zkoumání chování vzorků během výpalu bylo použito vysokoteplotní XRD analýzy (HT – XRD). Během měření byla teplota opakovaně navyšována, a to vždy o 33 °C během 5 minut. Během každého z teplotních kroků od teploty 600 °C do teploty 1266 °C bylo provedeno měření na 3 pozorovaných oblastech (Tab. 1, Obr. 1) odpovídající Millerovým indexům (2 2 0), (1 1 1) a (2 0 0). Pro XRD analýzu byl použit multifunkční difraktometr Panalytical Empyrean s vysokoteplotní komorou Anton Paar HTK 2000N (platinový ohřevný pásek). Naměřená data byla následně použita pro výpočet parametru velikosti krystalitu za pomoci Scherrerovy rovnice.

Tab. 1 Bližší specifikace pozorovaných oblastí.

	2 θ [°]	Millerovy indexy (h k l)
Oblast 1	32,22	(2 2 0)
Oblast 2	37,37	(1 1 1)
Oblast 3	53,89	(2 0 0)



Obr. 1 Pozorované oblasti dle Millerových indexů.

Velikost krystalitu byla vypočítána za pomoci Scherrerovy rovnice [11], [12].

$$B(2\theta) = \frac{K \cdot \lambda}{L \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

Kde B je šíře píku v polovině jeho výšky [rad], θ je Braggův úhel [rad], K je Scherrerova konstanta [-], λ je vlnová délka záření [Å] a L je rozměr krystalitu v kolmém směru k difrakční rovině [Å].

Pro výpočet velikosti krystalitů bylo však potřeba od naměřených dat ještě odečíst hodnoty přístrojového rozšíření.

$$\beta = \sqrt{B^2 - b^2} \quad (2)$$

Kde β je šíře píku v polovině jeho výšky po korekci [rad] a b je rozšíření píků vlivem nedokonalostí přístroje [rad].

Scherrerova rovnice po úpravě [13]

$$L = \frac{K \cdot \lambda}{\cos \theta} \cdot \frac{1}{\sqrt{B^2 - b^2}} \quad (3)$$

Scherrerova konstanta K je tzv. tvarový faktor a nabývá hodnot dle tvaru zrn. Pro náš výpočet byla volena hodnota 0,89 (dokonale kulaté krystality).

Stanovení přístrojového rozšíření bylo provedeno na standardu hexaboridu lanthanu (LaB₆), jehož naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 Hodnoty standardu LaB₆.

CaO		Standard LaB ₆	
Pík 2θ [°]	Pík 2θ [°]	FWHM [°]	FWHM [rad]
37	37,42	0,0743	0,001296122
30	30,35	0,0806	0,001406022
52	54,00	0,0741	0,001292633

3 VÝSLEDKY A DISKUZE

Pro demonstraci získaných výsledků byly z původní sady vybrány dva vzorky vápenců. Vzorek A je měkký vápenc s celkovým obsahem pórů vyšším než 42 %. Na rozdíl od toho vzorek B je rekrystalizovaný, velice kompaktní vápenc, jehož porozita je nižší než 1 % (Tab. 3).

Tab. 3 Klasifikace vápenců – chemické složení a porozita.

Vzorek	Kategorie	CaCO ₃ [%]	MgCO ₃ [%]	Porozita [%]
A	Měkký, porézni	98,21	0,77	42,12
B	Tvrký, rekrystalizovaný	98,46	0,41	0,72

Kategorie a porozita vzorků koresponduje se způsobem vzniku jednotlivých vápenců a jejich geologickým věkem. Stáří kompaktního rekrystalizovaného vzorku B bylo určeno jako více než 600 miliónů let, zatímco měkký a porézni vzorek A by se dal označit za geologicky mladý se stářím necelých 100 miliónů let. Tab. 4 ukazuje geologické stáří vzorků a jejich zařazení dle Dunhamovy klasifikace.

Tab. 4 klasifikace vápenců – geologické zařazení.

Vzorek	Geologické stáří			Dunhamova klasifikace
	Perioda	Epocha	Stáří [mil. let]	
A	Křída	Svrchní křída	83	Bioklastický wackestone
B	Neoproterozoikum	Kryogén	677	Peloidní cementstone

Za pomoci XRD analýzy byly z difraktogramů stanoveny teploty konce dekarbonatace a počátku formování CaO. Hodnoty se lišily v závislosti, zda se jednalo o měkké porézni vzorky nebo naopak vzorky rekrystalizované. U vzorků s kompaktní rekrystalizovanou strukturou bylo zapotřebí vyšší teploty (vyššího množství tepla) pro celkový rozklad CaCO₃ a podobně pro tvorbu CaO ve srovnání s porézni vzorky, jak ukazuje Tab. 5.

Tyto rozdíly jsou pravděpodobně způsobeny rychlostí šíření tepla v porézni struktuře vzorku. To znamená, že rychlost dekarbonizace je přímo ovlivněna porozitou vzorku – nejen hodnotou celkového obsahu pórů, ale také zda se jedná o systém s otevřenými či uzavřenými póry.

Tab. 5 Teploty konce dekarbonatace a začátku krystalizace CaO.

Vzorek	A	B
Konec rozkladu CaCO ₃	700 °C	733 °C
Počátek krystalizace CaO	633 °C	666 °C

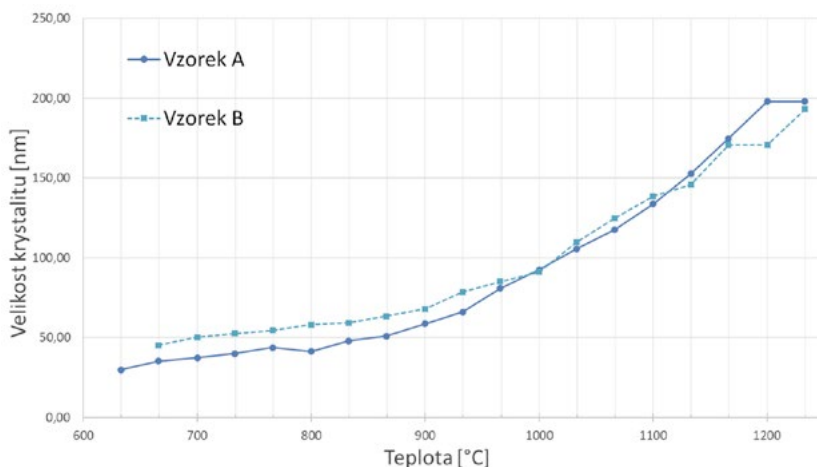
Pro objasnění výše zmíněných teplotních údajů je důležité si uvědomit, že tyto hodnoty ve skutečnosti nejsou přesným začátkem nebo koncem jednotlivých procesů, ale prvním měřením, kdy byla pozorována změna stavu.

Pro každý vzorek byly z difraktogramů získány hodnoty šíře píku v polovině jeho výšky (FWHM) ve třech pozorovaných oblastech, a to v teplotním rozsahu 600–1233 °C. Tato data po korekci přístrojového rozšíření byla použita k výpočtu velikosti krystalitů v jednotlivých krystalografických rovinách jak lze vidět v Tab. 6. Pro tyto výpočty byla použita upravená Scherrerova rovnice (3).

Tab. 6 Velikost krystalitů.

Teplota [°C]	Velikost krystalitu [nm]					
	Oblast 1		Oblast 2		Oblast 3	
	A	B	A	B	A	B
600	-	-	39,43	-	28,92	-
633	29,99	-	32,85	34,22	29,36	31,98
666	35,35	45,28	32,38	34,96	28,98	32,49
700	37,50	50,19	33,62	38,02	29,56	34,28
733	40,13	52,81	35,10	39,59	31,34	34,41
766	43,80	54,63	37,52	41,10	33,23	37,35
800	41,46	58,10	39,39	41,30	35,80	39,04
833	48,03	59,36	43,84	43,18	37,84	42,09
866	50,97	63,56	46,75	46,24	44,75	47,52
900	58,70	67,98	52,33	50,11	53,66	50,38
933	66,05	78,62	60,52	56,29	68,45	57,04
966	80,94	85,12	73,75	64,47	82,88	70,33
1000	92,57	91,28	93,97	73,83	98,06	83,85
1033	105,78	109,82	116,34	94,52	129,81	98,36
1066	117,69	124,69	133,77	106,19	162,42	113,81
1100	133,77	138,47	163,50	116,85	213,16	133,87
1133	152,63	145,88	180,20	136,84	286,29	145,58
1166	174,77	162,96	230,83	157,03	506,83	178,59
1200	197,90	170,72	288,94	217,21	-	257,94
1233	197,90	192,96	335,56	247,18	-	304,60

Na Obr. 2 je znázorněn růst velikosti krystalitů CaO v závislosti na zvyšující se teplotě. Do teploty 833 °C je růst velikosti krystalitů různý. V teplotním intervalu 833–1200 °C je však patrná lineární závislost růstu krystalitů od velikosti 47 nm a to v případě obou vzorků. Při teplotě nad 1200 °C se už velikost krystalitů různí. Jednou z příčin tohoto jevu může být deformace platinového ohřevného pásku vlivem vysoké teploty.



Obr. 2 Srovnání velikostí krystalitů (Oblast 1).

4 ZÁVĚR

Tento výzkum byl zaměřen na sledování změn v mikrostruktuře vápna během výpalu. Na základě výsledků byla nalezena souvislost mezi koncem dekarbonatace, počátkem růstu krystalitů CaO a vlastnostmi vápence. Hlavními ovlivňujícími faktory jsou způsob geneze a diagenese vápence, které přímo souvisí s jeho porozitou, a tak i s rychlostí šíření tepla uvnitř zrna během výpalu. Z výsledků je zřejmé, že úplná dekarbonatace kalcitu měkkých, vysoce porézních vzorků nastává již při nižší teplotě, než je tomu v případě rekrystalizovaných, málo porézních vzorků. Dále byl zkoumán růst krystalitů CaO a byla pozorována jeho lineární závislost s rostoucím časem v intervalu 866–1266 °C. Na základě získaných výsledků byla stanovena velikost krystalitů ve všech třech sledovaných krystalografických rovinách a bylo tak možné vypočítat velikost základních buňek obou vzorků.

Poděkování

Tento příspěvek byl financován v rámci projektu FAST-J-20-6520 „Vliv geneze a typu vápence na proces dekarbonatace a sintrace CaO“.

Použité zdroje

- [1] J. Wuhner, Zement-Kalk-Gips International, 6 (1953) 354-368.
- [2] F. Birch, H. Clark, The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition part I, Am J. Sci. 238(8) (1940) 529-558.
- [3] F. Birch, H. Clark, The thermal conductivity of rocks and its dependence upon temperature and composition part II, Am J. Sci. 238(9) (1940) 615-635.
- [4] A. Wolter, S. Hogewoning, Vorhersage und Beeinflussung der Reaktivität von Branntkalk, Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.: 94 (2008) TU Claustahl.
- [5] D. Hai Do, E. Specht, Determination of Reaction Coefficient, Thermal Conductivity and Pore Diffusivity in Decomposition of Limestone of Different Origin, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2011 Vol II, 6 (2011), ISBN: 978-988-19251-7-6
- [6] G. Pohl, TIZ International, 87 (1963) 417-424.
- [7] G. Pohl, Zement-Kalk-Gips International, 12 (1959) 566-572.
- [8] C. Rodriguez-Navarro, E. Ruiz-Agudo, A. Luque, A. B. Rodriguez-Navarro, M. Ortega-Huertas, Thermal decomposition of calcite: Mechanisms of formation and textural evolution of CaO nanocrystals, American Mineralogist, 94 (2009) 578–593.
- [9] C. Eichhorn, Th. Bohne, B. Joschko, A. Wolter, Thermisches Ausdehnungsverhalten von Kalkstein - Bestimmungsmethoden und Bewertungshintergrund, Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V.: 184 (2012).

- [10] J. M. Valverde, P. E. Sanchez-Jimenez, L. A. Perez-Maqueda, Limestone Calcination Nearby Equilibrium: Kinetics, CaO Crystal Structure, Sintering and Reactivity, *J. Phys. Chem. C*, 119 (4) (2015) 1623–1641,
- [11] P. Scherrer, Bestimmung der Grosse und der Inneren Struktur von Kolloidteilchen Mittels Rontgenstrahlen, *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften, Gottingen. Mathematisch-Physikalische Klasse*, 2 (1918) 98-100.
- [12] A. L. Patterson, The Scherrer Formula for X-Ray Particle Size Determination. *Physical Review*, 56(10) (1939) 978-982.
- [13] J. R. Hook, H. E. Hall, *Solid state physics*. 2nd ed. New York: Wiley, 1995. ISBN 978-0-471-92805-8.

MIKROSTRUKTURA MALT NA BÁZÍ VZDUŠNÉHO VÁPNA MODIFIKOVANÝCH BIOPOLYMERNÍMI PŘÍRADAMI

MICROSTRUCTURE OF BIOPOLYMER-MODIFIED AERIAL LIME MORTARS

Tomáš Žižlavský*¹

*zizlavsk.t@fce.vutbr.cz

¹Vysoké Učení Technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Přísady na bázi celulosy jsou běžně používány při výrobě stavebních hmot, především suchých omítkových a maltových směsí. V poslední době se také začínají využívat alternativní přísady na biopolymerní bázi, které mají ve stavebních materiálech obdobně, viskozitu modifikující, účinky jako deriváty celulosy avšak s odlišnou účinností. Při volbě vhodné přísady by mimo jiné měl být brán ohled i na různé postupy výroby, stejně jako i různé mechanismy funkce jednotlivých přísad. V této práci je zkoumán vliv těchto alternativních přísad v různých dávkách na mikrostrukturu vápenných malt. Malty byly připraveny se stejnou zpracovatelností a byl stanoven obsah vzduchu v čerstvé maltě, jelikož může značně ovlivňovat výslednou mikrostrukturu zatvrdlé malty. Hydroxypropyl chitosan vykazoval provzdušňující účinek, zatímco přídavek karboxymethyl derivátu chitosanu obsah vzduchu v čerstvé maltě snížil, stejně tak jako guma diutanová, která vyžadovala značně vyšší množství záměsové vody pro dosažení stejné konzistence. Použitím přísad se zvýšil objem malých pórů menších než 0,1 μm a velkých pórů kolem 10 μm , avšak pouze přídavek diutanové gumy ovlivnil také rozložení v oblasti kapilárních pórů, které jsou pro vápennou maltu nejtýpější.

Klíčová slova

Vápenná malta, porozita, transport vlhkosti, elektronová mikroskopie, biopolymerní přísady

Abstract

Cellulose-based viscosity-modifying admixtures are used on daily basis in a wide range of building materials, dominantly in pre-mixed mortar systems. Lately, alternative admixtures such as different “gums” have emerged. In building materials, the gums have similar viscosity-enhancing effects as cellulose ethers with different efficiency. Various ways of production, as well as diverse working mechanisms of the biopolymers are to be considered while choosing the most suitable admixture for the intended use. Influence of alternative admixtures in several doses on the microstructure of lime mortars was studied in this paper. Mortars were prepared with the same workability and the air content in fresh mortar was determined, for it can have notable impact on microstructure of hardened mortar. Hydroxypropyl derivative of chitosan showed air entraining ability, while the carboxymethyl derivative reported slight decrease in amount of air entrained into the mixture. In the case of diutan gum, the most water-demanding admixture, the percentage of entrained air dropped with growing dose. Admixture addition increased the volume of pores in diameter lower than 0.1 μm , and in region of pores around 10 μm . Only the diutan gum affected the distribution of capillary pores, which are typical for lime mortars. Hygric properties were in correlation with air content values.

Key words

Lime mortar, porosity, hygric properties, scanning electron microscopy, biopolymeric admixtures

1 ÚVOD

Vzdušné vápno mělo jako pojivo po staletí nezastupitelnou roli v rámci celého komplexního stavebního systému od výplňového betonu v masivním zdvu až po jemné dekorativní využití, například fresky. Jeho hlavní nevýhodou je však nízká trvanlivost, která se projevuje především při jeho využití v exteriéru, kde vyžaduje stálou péči. V

případě, že je tato zanedbána, nebo je celý systém narušen nekompatibilním materiálem, dochází k nevratnému poškození budov a ztrátě kulturního dědictví. Trvanlivost materiálu je ovlivněna mnoha faktory, od způsobu nanášení a podmínek v průběhu zrání až po mikrostrukturu výsledné malty.

Dle A. Izaguirre a kol [1] jsou trvanlivost a fyzikálně mechanické vlastnosti vápenných malt úzce spojeny s jejich nasákavostí, která je nejvíce ovlivněna jejich porozitou. Porozitu může ovlivnit několik faktorů, především množství záměsové vody a chemické a mineralogické složení kameniva. Je všeobecně známo, že z vápencového kameniva připravíme maltu lepších vlastností než z kameniva křemenného [2], [3], [4], [5], [6]. Avšak teorií snažících se toto vysvětlit je vícero a i vliv kameniva na porozitu výsledné malty se výrazně liší i ve studiích se zdánlivě stejnými parametry [2], [6]. S rostoucím množstvím záměsové vody roste i celková porozita vápenné malty [7], avšak fyzikálně mechanické vlastnosti vápenných malt jsou výrazně méně ovlivněny celkovou porozitou malty, čímž se vymykají Powersově rovnici využívané u cementových kompozitů. I přesto jsou pevnosti vápenných malt ovlivněny množstvím záměsové vody [8], avšak s mnohem nižší citlivostí v oblasti běžně využívaných hodnot vodního součinitele v porovnání s hydraulickými pojivy [9].

Využití vodoretěných přísad, povětšinou i modifikujících viskozitu, je hojně rozšířeno v průmyslu stavebních hmot, především u suchých omítkových a maltových směsí a samozhutnitelného betonu [10], [11]. Tyto přísady, většinou na bázi celulosy, zajišťují dostatečnou vlhkost směsi v průběhu zrání a zamezují nadměrnému vysoušení materiálu ať už podkladními vrstvami nebo vlivem povětrnostních činitelů. Kromě přísad na bázi celulosy jsou využívány, ale především studovány přísady na bázi biopolymerů [10]. Bylo zjištěno, že některé z těchto přísad jsou pro využití ve vápenných maltách vhodnější než deriváty celulosy [1], [12], [13].

V práci je sledován vliv čtyřech různých biopolymerních přísad: hydroxypropyl a karboxymethyl derivátů chitosanu (HPCH resp. CMCH) zastupujících chemicky upravené biopolymery, diutanové gumy (DG), zástupce biopolymerů produkovaných mikroby a alginátu sodného (ALGNA) získávaného z mořských řas, obdobně jako karagenan či agar, na mikrostrukturu vápenných malt. Jejich vliv byl zatím sledován pouze za využití konstantního vodního součinitele, kde jsou však, v případě vysoce účinných přísad, výsledky nepříznivě ovlivněny rozdílnou zpracovatelností [14], [15]. V této práci je snaha o omezení tohoto vlivu přípravou malt o stejné konzistenci stanovené pomocí střešovacího stolku (EN 1015-3). Tento přístup je také bližší skutečnému použití těchto malt, neboť pracovníci jsou zvyklí na malty stejných konzistencí nezávisle na jejich složení.

2 MATERIÁLY A METODY

Suroviny a příprava vzorků

Malty byly připraveny smícháním suché směsi sestávající z: vápenného hydrátu CL 90 S (Carmeuse Czech republic, Mokrý), převážně křemičitého písku frakce 0–4 mm (Českomoravský šterk, a.s., Hulín) v hmotnostním poměru 1:3 a přísad v dávkě 0,1 %, 0,5 % a 1 % z hmotnosti pojiva; s vodou s vodním součinitelem uvedeným v Tab. 1, čímž bylo dosaženo rozlivu malty na střešacím stolku 160±5 mm. Z těchto malt byly připraveny vzorky ve formě trámečků o rozměrech 40×40×160 mm. Tyto byly po odformování uloženy v laboratorních podmínkách (20 °C, 55 % rel. vlhkosti) až do stáří 90 dnů, kdy byly provedeny zkoušky.

Tab. 1 Složení a vlastnosti jednotlivých směsí.

Zkratka.	Chemické složení	Dávka [%]	Vodní součinitel [-]	Výrobce	Obsah vzduchu [%]
REF	–	–	1,025	–	3,90
HPCH	hydroxypropyl chitosan	0.1	1,000	Kraeber & Co GmbH	3,70
		0.5	1,100		10,00
		1.0	1,120		11,15
CMCH	karboxymethyl chitosan	0.1	1,030	Kraeber & Co GmbH	3,20
		0.5	1,100		2,35
		1.0	1,180		2,30
		0.1	1,047		3,30
ALGNA	alginát sodný	0.5	1,130	Sigma-Aldrich, Co	4,00
		1.0	1,195		4,30
		0.1	1,250		2,55
DG	diutanová g.	0.5	1,475	CP Kelco	1,80
		1.0	1,735		2,20

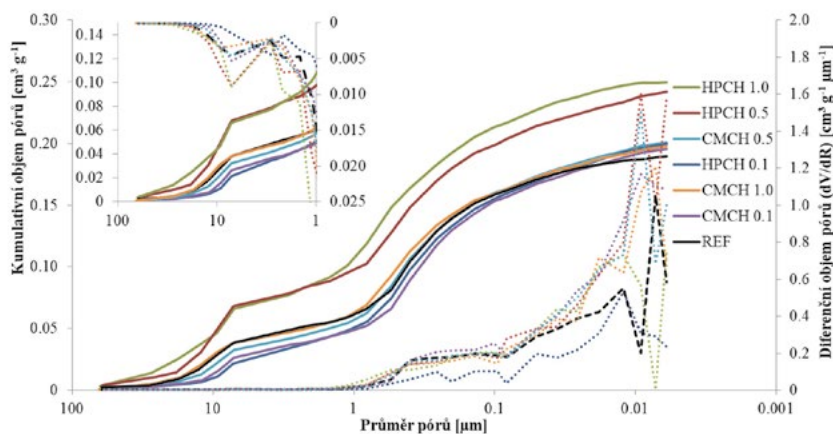
Postupy zkoušení

Před uložením malty do formy byl stanoven obsah vzduchu v čerstvé maltě (EN 1015-7). Na vzorcích po 90 dnech zrání byla sledována porozita pomocí vysokotlakého rtuťového porozimetru Micrometrics Pore Sizer 9310. Ze získaných dat byla zjištěna celková porozita vzorků a byly vykresleny distribuční křivky. Jako další postup pro sledování vnitřní mikrostruktury bylo využito součinitele kapilární vztlácnosti stanoveného postupem dle EN 1015-18. Mikrostruktura vybraných vzorků byla sledována i pomocí elektronové mikroskopie.

3 VÝSLEDKY A DISKUSE

Distribuce pórů.

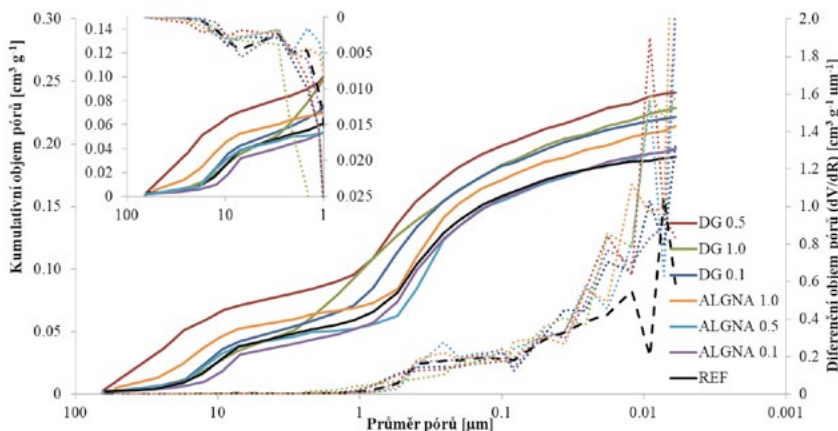
Porozity vzorků byly znázorněny jako křivky kumulativní distribuce pórů (plné čáry) a křivky diferenční (tečkované resp. čárkované čáry) na obrázcích Obr. 1 a Obr. 2, na kterých je ve výřezech přiblížen průběh těchto křivek v oblasti velkých pórů (pro větší přehlednost je diferenční křivka ve výřezu zobrazena na převrácené ose Y). Tvar kumulativních křivek je typický pro vápenné malty [6], [14] s největším objemem pórů v rozmezí 0,1–1 μm [1], [3], [6], [7], [8], [12], [14], [15]. Tvar křivky v tomto intervalu zůstává nezměněný pro malty modifikované deriváty chitosanu a alginátem sodným v nižších dávkách (0,1 a 0,5 %), naznačujíc kompenzaci vlivu zvýšeného vodního součinitele biopolymerní přísadou [7]. Zatímco v případě diutanové gumy rostoucí dávka přísady (ale také vodní součinitel) vedou k menšímu sklonu křivky a tím širšímu intervalu zahrnujícímu nejhojněji zastoupené velikosti pórů. Počátek tohoto intervalu se posouvá do oblasti pórů o větší velikosti, stejně jak pozorovali M. Arandigoyen a kol. [7] u malt s rostoucím vodním součinitelem. Tento posun však není natolik výrazný, jak by se na základě jejich výsledků očekávalo, tedy i zde je patrný vliv přísady. Všeobecně biopolymerní přísady mírně snižují objem pórů v tomto intervalu, ALGNA a CMCH přímo úměrně dávce přísady, zatímco HPCH a DG byly v tomto směru neúčinnější v množství 0,5 % z hmotnosti vápna. Tyto výsledky jsou v rozporu se závěry A. Izaguirre a kol. [12], kteří na vápenných maltách modifikovaných guarovou gumou pozorovali zúžení tohoto intervalu za současného zvýšení objemu pórů v něm. Vliv přídavku CMCH pozorovaný M. Lasheras-Zubiare a kol. [16] na cementových maltách (výrazný nárůst velikosti nejhojnějších pórů) nebyl v případě vápenných malt zjištěn.



Obr. 1 Kumulativní a diferenční křivky distribuce pórů malt modifikovaných deriváty chitosanu.

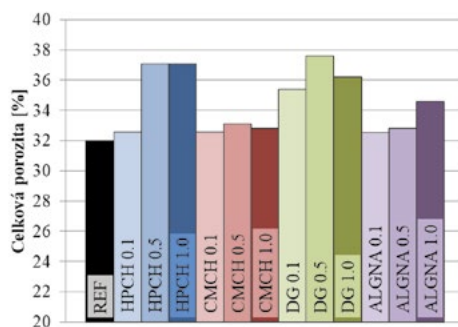
Další výraznější výskyt pórů je v oblasti velkých pórů o průměru kolem 10 μm . Tyto póry se tvoří především v průběhu míchání směsi a variace křivek v této oblasti naznačuje odlišnou reologii jednotlivých malt i přes stejnou zpracovatelnost. Nejvýznamnější rozdíl je zde mezi deriváty chitosanu a neupravenými biopolymery (ALGNA a DG), kde přídavek provzdušňujícího HPCH (Tab. 1, [15]) vede k nárůstu objemu pouze těchto pórů bez významného ovlivnění jejich distribuce a CMCH objem těchto pórů naopak snižuje. ALGNA ani DG nemají prokázanou provzdušňující funkci ve vápenných maltách [17] a tedy je nárůst množství těchto pórů způsoben pouze rozdílnou reologií. Tímto způsobem ALGNA v nejvyšší a DG v prostřední (0,5 %) dávce podporují nejen vznik těchto pórů, ale zvyšují i jejich velikost. Přidáním 1 % diutanové gumy dojde k poklesu množství pórů

v tomto intervalu, avšak jejich objem je rovnoměrněji rozdělen do širokého intervalu od mikropórů o setinách mikrometru až do úrovně přibližně 3 μm .



Obr. 2 Kumulativní a diferenční křivky distribuce pórů malt modifikovaných diutanovou gumou a alginátem sodným.

Celková porozita, jejíž hodnoty jsou znázorněny na Obr. 3 je ovlivněna především množstvím velkých pórů kolem 10 μm , avšak je mírně vyšší i v případě přísad jako CMCH, které objem velkých pórů snižují. Příčinu tohoto nárůstu můžeme pozorovat na Obr. 1, ve formě rozdílného sklonu křivky v oblasti malých pórů pod 0,1 μm v porovnání s referenční maltou. Tento sklon je u všech modifikovaných malt vyšší, než v případě referenční malty a můžeme tedy prohlásit, že použitím přísad je mírně podpořen vznik velmi malých pórů. Tento byl sledován i na případě gumy guar [12] a jejího hydroxypropyl derivátu [1] v pracích A. Izaguirre a kol.



Obr. 3 Celková porozita zkoumaných malt.

Kapilární absorpce vody

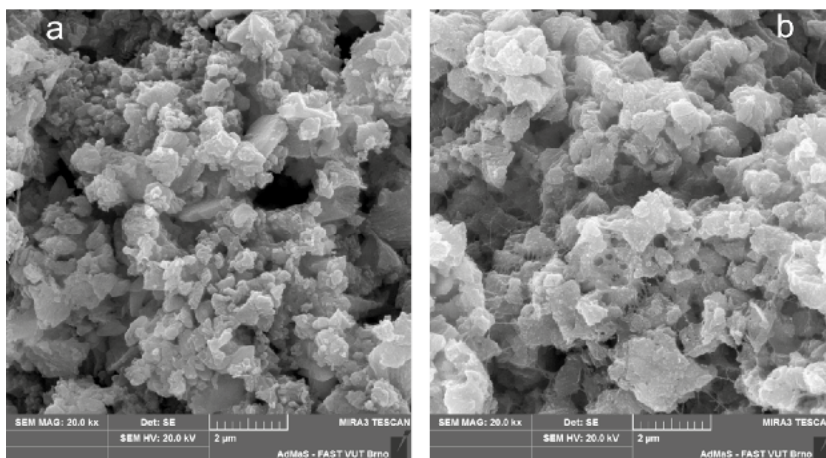
Pro charakterizaci vlhkostního transportu v maltách byl stanoven vlhkostní absorpční koeficient (C) a součinitel vlhkostní vodivosti (D_w), které jsou shrnuty v Tab. 2. Vlhkostní absorpční koeficient, což je číselně vyjádřená směrnice lineární části absorpční křivky, je v porovnání s referenční maltou nižší v případě malt modifikovaných HPCCH, nejnižší dávkou CMCH a nejvyšší dávkou ALGNA. Využitím těchto biopolymerů v maltách lze tedy omezit transport vlhkosti v nich a tím zlepšit jejich trvanlivost [1], [18]. Snižování absorpčního koeficientu je způsobeno přerušením kapilár vzduchovými póry [18], tedy především malty s vyšším obsahem vzduchu v čerstvé maltě dosáhly nižších hodnot. Výjimkou z tohoto je ALGNA v množství 1 % z hmotnosti pojiva, kde i přes nepatrný rozdíl v obsahu vzduchu dochází k podstatnému narušení kapilárního transportu. Toto je způsobeno odlišnou distribucí pórů, jak můžeme pozorovat na Obr. 2, kde je patrný výskyt většího množství velkých pórů v zatvrdlé maltě. Různorodé výsledky u malt DG 0,5 a DG 1,0 jsou také pravděpodobně způsobeny značně alternativní pórovou strukturou.

Tab. 2 Vlhkostní absorpční koeficient (C) a součinitel vlhkostní vodivosti (D_w) pro zkoumané malty.

	REF	HPCH 1	HPCH 5	HPCH 10	CMCH 1	CMCH 5	CMCH 10	DG 1	DG 5	DG 10	ALGNA 1	ALGNA 5	ALGNA 10
C [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0,5}$]	0,214	0,182	0,162	0,154	0,197	0,226	0,226	0,266	0,366	0,254	0,334	0,216	0,228
D_w [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]	0,80	0,50	0,45	0,40	0,56	0,80	0,76	1,03	1,83	1,06	1,77	0,69	0,76

Elektronová mikroskopie

Na většině snímků vybraných vzorků modifikovaných vápenných malt nebyly elektronovou mikroskopií pozorovány žádné mikrostrukturní změny. Z Obr. 4a vidíme, že pojivová složka malty sestává z krystalů kalcitu a portlanditu obklopujících kapilární póry doplněných o malé množství ettringitu (tyčinkovité krystaly na levém okraji Obr. 4a). Pouze u malt modifikovaných přísadkou diutanové gummy (Obr. 4b) je možno pozorovat vznik síťovitých útvarů spojujících jednotlivé skupiny krystalů. Tyto útvary byly pozorovány pouze v maltách s přísadkou diutanové gummy a proto můžeme usuzovat, že jsou přímým důsledkem jejího použití v těchto maltách. Je také možné, že právě tyto struktury stojí i za výrazně pozměněnou pórovou strukturou (Obr. 2) malt s přísadkou DG.



Obr. 4 Snímky z elektronového mikroskopu malty referenční (a) a malty DG 1,0 (b).

4 ZÁVĚR

Byl sledován vliv čtyř biopolymerů (hydroxypropyl a karboxymethyl derivátů chitosanu, diutanové gummy a alginátu sodného) na mikrostrukturu vápenných malt o stejné zpracovatelnosti. Na základě prezentovaných výsledků můžeme vyvozovat tyto závěry:

- Hydroxypropyl chitosan má, jako jediná ze sledovaných přísad, provzdušňující účinky, čímž podpořil vývin pórů o průměru kolem $10 \mu\text{m}$ a tím i nárůst celkové porozity. Provzdušnění malty se také, z pohledu trvanlivosti, příznivě projevilo snížením koeficientu kapilární absorpce vody.
- Karboxymethyl chitosan v nejnižší dávce (0,1 %) také snižuje vlhkostní absorpční koeficient, avšak bez pozorovatelných změn v pórové struktuře malty.
- Malty s přísadkou diutanové gummy vyžadují výrazně vyšší vodní součinitel pro dosažení dané zpracovatelnosti. V dávce 0,5 % podporuje vznik velkých pórů kolem $10 \mu\text{m}$ a v množství 1 % výrazně pozměnila pórovou strukturu malty. Díky nízkému obsahu vzduchu v maltách spolu

s vysokou celkovou porozitou dosahují malty s diutanovou gumou nejrychlejšího transportu vlhkosti, čímž se zhoršuje jejich trvanlivost. Diutanová guma byla jedinou přísadou, jejíž vliv je pozorovatelný pomocí elektronové mikroskopie.

- Alginát sodný v nízkých dávkách nevykazoval výrazné ovlivnění pórové struktury ani vlhkostních charakteristik připravených malt. V nejvyšší dávce (1 %) však podporuje vznik velkých pórů a tím výrazně zpomaluje transport vlhkosti maltou.

Jako nejvhodnější přísada do vápenných malt zlepšující jejich trvanlivost se jeví hydroxypropyl chitosan, díky ovlivnění vlhkostních charakteristik, avšak je možné zvážit i využití alginátu sodného. Malty modifikované těmito přísadami budou podrobeny zkoušení trvanlivosti pro detailnější pozorování jejich vlivu na vápenné malty. Karboxymethyl chitosan a diutanová guma vykazovaly téměř žádný respektive negativní vliv na předpokládanou trvanlivost vápenných malt a nebyly shledány přínosnými pro ovlivnění jejich trvanlivosti, alespoň ne při zkoumaném dávkování.

Poděkování

Práce byla zpracována za finančního přispění projektu specifického výzkumu VUT FAST-J-20-6289.

Použitá zdroje

- [1] IZAGUIRRE, A., J. LANAS a J.I. ÁLVAREZ. Ageing of lime mortars with admixtures: Durability and strength assessment. *Cem Concr Res.* 2010, 40(7), 1081-95.
- [2] VICAT, L.-J., SMITH, J. T., ed. *A Practical and Scientific Treatise on Calcareous Mortars and Cements, Artificial and Natural.* Cambridge: Cambridge University Press, 2014. ISBN 9781107294257.
- [3] LANAS, J. a J. I. ALVAREZ-GALINDO. Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. *Cem Concr Res.* 2003, 33(11), 1867-76.
- [4] POZO-ANTONIO, J.S. Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate. *Constr Build Mater.* 2015, 77, 472-8.
- [5] ARIZZI, A. a G. COULTRONE. The water transfer properties and drying shrinkage of aerial lime-based mortars: an assessment of their quality as repair rendering materials. *Env E Sci.* 2014, 71(4), 1699-710.
- [6] SANTOS, A. R., M. DO ROSÁRIO VEIGA, A. SANTOS SILVA, J. DE BRITO a J. I. ÁLVAREZ. Evolution of the microstructure of lime based mortars and influence on the mechanical behaviour: The role of the aggregates. *Constr Build Mater.* 2018, 187, 907-22.
- [7] ARANDIGOYEN, M., J.L. PÉREZ BERNAL, M.A. BELLO LÓPEZ a J.I. ALVAREZ. Lime-pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity. *Appl Surf Sci.* 2005, 252(5), 1449-59.
- [8] PAPAYIANNI, I. a M. STEFANIDOU. Strength-porosity relationships in lime-pozzolan mortars. *Constr Build Mater.* 2006, 20(9), 700-5.
- [9] LAWRENCE, R. M. H. The impact of the water/lime ratio on the structural characteristics of air lime mortars. D'AYALA, D. F. a E. FODDE, ed. *Structural Analysis of Historic Construction: Preserving Safety and Significance.* London: Taylor and Francis, 2008, s. 885-9.
- [10] VAN DER VURST, F., S. GRÜNEWALD, D. FEYS, K. LESAGE, L. VANDEWALLE, J. VANTOMME a G. DE SCHUTTER. Effect of the mix design on the robustness of fresh self-compacting concrete. *Cem Concr Compos.* 2017, 82, 190-201.
- [11] PLANK, J. Applications of biopolymers and other biotechnological products in building materials. *Applied Microbiology and Biotechnology.* 2004, 66(1), 1-9.
- [12] IZAGUIRRE, A., J. LANAS a J.I. ÁLVAREZ. Characterization of aerial lime-based mortars modified by the addition of two different water-retaining agents. *Cem Concr Compos.* 2011, 33(2), 309-18.
- [13] VYŠVAŘIL, M., M. HEGROVÁ a T. ŽIŽLAVSKÝ. Influence of Cellulose Ethers on Fresh State Properties of Lime Mortars. *Solid State Phenom.* 2018, 276, 69-74.
- [14] ŽIŽLAVSKÝ, T., M. VYŠVAŘIL, P. BAYER a P. ROVNANÍKOVÁ. Properties of Aerial Lime-Based Mortars with Chitosan Ethers. *Solid State Phenom.* 2018, 276, 75-82.
- [15] ŽIŽLAVSKÝ, T.; VYŠVAŘIL, M.; BAYER, P.; ROVNANÍKOVÁ, P. Impact of guar gum and chitosan ethers on physico-mechanical properties and durability of natural hydraulic lime mortars. In *PRO 130: 5th Historic Mortars Conference.* Francie: RILEM Publications S.A.R.L., 2019. p. 1279-1290.
- [16] LASHERAS-ZUBIATE, M., I. NAVARRO-BLASCO, J.I. ÁLVAREZ a J.M. FERNÁNDEZ. Interaction of carboxymethylchitosan and heavy metals in cement media. *J Haz Mater.* 2011, 194, 223-31.
- [17] ŽIŽLAVSKÝ, T, M VYŠVAŘIL a P ROVNANÍKOVÁ. Characterization of aerial lime-based mortars with addition of biopolymers. *IOP Conference Series: Mater Sci Eng.* 2018, 379.
- [18] PAIVA, H., L.P. ESTEVES, P.B. CACHIM a V.M. FERREIRA. Rheology and hardened properties of single-coat render mortars with different types of water retaining agents. *Constr Build Mater.* 2009, 23(2), 1141-6

ALKALICKO-KŘEMIČITÁ REAKCE U ALKALICKY AKTIVOVANÝCH POJIV (ZRYCHLENÉ ZKOUŠKY)

ALKALI-SILICA REACTION IN ALKALINE ACTIVATED BINDERS (ACCELERATED TESTS)

Cecílie Mizerová^{*1}

^{*}mizerova.c@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Tato práce byla zaměřena na expanzi alkalicky aktivovaných malt s reaktivním kamenivem a možnost alkaliccko-křemičité reakce. U malt na bázi alkalicky aktivované strusky, popílku a metakaolinu byly provedeny zrychlené zkoušky maltových trámečků dle německé směrnice DAfStb. Kromě expanze byly u pojiv stanoveny také mechanické vlastnosti v závislosti na délce uložení ve zkušebních podmínkách (ponoření v roztoku NaOH při 80 °C). Změny pevnosti v tlaku v důsledku uložení těles ve zkušebním roztoku naznačují, že použití této metody pro alkalicky aktivovaná pojiva může být problematické.

Klíčová slova

Alkaliccko-křemičítá reakce, alkalická aktivace, expanze, pevnost

Abstract

This study focused on expansion of alkaline activated mortars with reactive aggregate and possibility of alkali-silica reaction. Mortars based on alkaline activated slag, fly ash and metakaolin were subjected to accelerated mortar bar test according to German DAfStb-guideline. Besides expansion, the mechanical properties of binders were determined depending on the time of exposure in test conditions (immersion in NaOH solution at 80 °C). Changes of compressive strength affected by time of the immersion in test solution indicate that the application of this method for alkaline activated binder could be problematic.

Key words

Alkali-silica reaction, alkaline activation, expansion, strength

1 ÚVOD

Alkaliccko-křemičítá reakce u alkalicky aktivovaných materiálů a geopolymérů

Alkaliccko-křemičítá reakce (ASR) je proces, jehož negativní důsledky jsou v tradičních betonech na bázi Portlandského cementu pozorovány od 40.–50. let minulého století. Jedná se o reakci amorfního SiO₂ (z cementu anebo reaktivního kameniva) s alkáliemi přítomnými v pórovém roztoku betonu. Nově vzniklé reakční produkty mají výrazně expanzivní charakter a způsobují nárůst vnitřního napětí betonu, vznik trhlin a mohou vést až ke kolapsu konstrukce. K alkaliccko-křemičíté reakci dochází pouze za současné přítomnosti dostatečné vlhkosti [1], [2].

Alkaliccky aktivované materiály jsou pojiva vyrobená ze surovin s amorfní hlinito-křemičitanovou fází, které se smísí s alkalickým aktivátorem, nejčastěji ve formě alkalicckých hydroxidů nebo křemičitanů. K alkaliccké aktivaci se používá např. granulovaná vysokopeční struska, různé druhy popílků nebo jílových surovin. Pojiva s velmi nízkým obsahem Ca lze označit také pojmem „geopolymery“, který je odvozen od jejich velmi pravidelně uspořádané mikrostruktury. Díky dobrým mechanickým vlastnostem, trvanlivosti nebo chemické odolnosti mohou být alternativou k běžnému Portlandskému cementu [3].

Přirozeně vysoký obsah alkálií v těchto pojivech s sebou pochopitelně přinesl otázku rizika odolnosti vůči alkaliccko-křemičíté reakci. Četné studie potvrdily, že rozsah případné alkaliccko-křemičíté reakce v souvislosti

s vysokým obsahem alkálií není v porovnání s cementem výrazně vyšší, ovšem ne zanedbatelný a ve velké míře závisí na složení vstupních surovin a podmínkách alkalické aktivace. Problematika by měla být řešena principiálně ve dvou odlišných typech pojiv, tedy alkalicky aktivované strusce a geopolymerech, protože přítomnost Ca významně ovlivňuje interakce reaktivního SiO_2 v zásaditém prostředí [2], [4], [5]. Studie alkalicky aktivované strusky přinesly různé výsledky, část uvádí expanzi v důsledku ASR srovnatelnou či vyšší ve srovnání s cementem, některé studie naopak menší riziko. Naopak u geopolymérů na bázi metakaolinu nebo popílku s nízkým obsahem Ca převažuje menší či zcela zanedbatelná expanze, nelze však říci, že by bylo použití reaktivního kameniva zcela bezpečné. Obecně závisí rozsah ASR u alkalicky aktivovaných materiálů na chemickém složení hlavní pojivové složky, typu a dávce alkalického aktivátoru, charakteristice reaktivního kameniva a také vybrané zkušební metodě [2].

Z hlediska chemismu pojivového systému bylo potvrzeno, že poměr Ca/Si a Al/Si hraje významnou roli pro tvorbu a vlastnosti reakčních produktů ASR. Rozpustnost Si závisí na pH, které může být výrazně zvýšeno přítomností Ca, respektive $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (jedna pH jednotka způsobí zvýšení rozpustnosti Si i o několik řádů). Navíc může docházet k výměnné reakci iontů Ca a Na/K, kdy Ca nahradí alkálie v ASR gelu a procesem jejich zpětného uvolnění do roztoku umožní tzv. recyklaci alkálií a další urychlování ASR [6]. Naopak nízký obsah Ca vede také k nižší viskozitě ASR gelu, který může být snadněji rozptýlen v matici prostřednictvím zaplnění porů a nezpůsobovat přímo expanzi [5].

Zatímco u alkalicky aktivované strusky jsou produkty ASR podobné krystalickým strukturám vznikajícím v běžném betonu, u geopolymérů má produkt podobu ASR gelu, který se částečně liší od gelu hlavní pojivové fáze. Zda a jak velké objemové změny geopolymérů může tento ASR gel způsobovat však stále není zcela jasné [7]. Riziko ASR se automaticky nezvyšuje s rostoucím obsahem jemných podílů reaktivního kameniva a záleží spíše na nejméně příznivém poměru reaktivního SiO_2 v poměru k obsahu alkáliím v betonu (hodnota $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ přibližně 12–13) [2]. Reaktivita kameniv s vysokým podílem amorfního SiO_2 může být navíc omezena za současné přítomnosti amorfního Al_2O_3 , což odpovídá studiím, kde byl metakaolin účinnější přísadou pro redukci ASR oproti křemičitým úletům [8].

Zkušební metody a přístup DAFStb při posuzování rizika vzniku ASR

Odolnost alkalicky aktivovaných pojiv vůči ASR byla nejčastěji zkoumána za použití zrychlených metod vyvinutých pro cement, kde jsou zkušební tělesa ponořena v 1M roztoku NaOH při 80 °C (standardní nebo modifikované zkoušky dle ASTM C-1260). V této práci byl zvolen podobný zkušební postup podle německé směrnice DAFStb, tzv. Alkali-Richtlinie, kterou vydal Německý výbor pro železobeton (DAFStb, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton) [9][8]. Tato komplexní norma uvádí postup a mezinárodně uznávané zkušební metody pro testování reaktivity kameniva a další doporučení pro předcházení škod způsobených ASR.

Zrychlená metoda rozpínání maltových trámečků podle této směrnice využívá standardní zkušební tělesa o rozměrech 40 × 40 × 160 mm, která jsou uložena v 1M roztoku NaOH při 80 °C, přičemž délkové změny a další jevy (trhliny, odlupování apod.) jsou sledovány po dobu 14 dnů. Pokud při ukončení zkoušky expanze vzorku nepřekročí 0,1 % (1 mm/m), považuje se kamenivo v daném pojivu za nereaktivní a bezpečné k použití. V případě překročení této hranice se přistupuje k dlouhodobé zkoušce betonových trámů o větších rozměrech, která trvá nejméně 140 dnů.

2 MATERIÁL A METODY

Pro zrychlené zkoušky ASR byla zpracována pojiva na bázi alkalicky aktivované strusky, popílku a metakaolinu a jako referenční materiál také trámečky ze zkušebního cementu AKR-Prüfzement CEM I 32,5 R (Na_2O eqv. 1,3 %) s přidaným K_2SO_4 (dle DAFStb). K alkalické aktivaci byla použita vysokopecní granulovaná struska (S) ecocem (Ecocem), vysokotepelní popílek (FA) EFA-Füller® S-B/F (BauMineral) a metakaolin (MK) MetaMax® (BASF). Vysoké složení vstupních surovin je uvedeno v Tab. 1. Alkalický aktivátor byl připraven kombinací 50% roztoku NaOH a vodního skla Betol®39 T (Woellner, $M_S = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 3,42$). U každé směsi bylo použito standardní kamenivo s vysokým obsahem SiO_2 (Q) a reaktivní kamenivo (droba, něm. Grauwacke, G). Kamenivo frakce 8–16 mm bylo podrceno a připraveno tak, aby splňovalo požadavky na zrnitost 0,125–4 mm definované uvedenou směrnici, které uvádí Tab. 2.

Tab. 1 Chemické složení vstupních surovin.

(%)	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	P_2O_5	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
MK	49,58	46,60	0,11	0,13	0,73	0,05	0,19	0,12	2,21
S	36,3	12,8	38,8	7,95	0,62	0,02	0,34	0,60	0,98
FA	53,95	22,89	5,31	1,50	7,49	0,59	0,60	1,64	1,04

Tab. 2 Křivka zrnitosti kameniva pro zkušební malty.

Frakce (mm)	Procentuální podíl (%)
2–4	10
1–2	25
0,5–1	25
0,25–0,5	25
0,125–0,25	15

Zkoušené malty byly připraveny podle receptur v Tab. 3, vždy bylo nejprve na nízký rychlostní stupeň smícháno pojivo s kamenivem (30 s), během dalších 30 s byla přidána záměsová voda a alkalický aktivátor. Poté následovalo míchaní při větší rychlosti (60 s). Konzistence malt na strásacím stolku odpovídala rozlíti 150 ± 20 mm.

Maltou pak byla ve dvou vrstvách naplněna trojforma 40 × 40 × 160 mm osazená ocelovými měřicími kolíky pro sledování délkových změn, každá vrstva byla zhutněna na vibračním stolku po dobu 120 s. Popílkové geopolymery byly zakryty a 24 h tepelně ošetřovány při 60 °C. Ostatní vzorky byly ponechány v klimatizační komoře při 20 ± 2 °C a relativní vlhkosti 65 %. Po 24 h byly vzorky odformovány, po stranách zdrsněny smirkovým papírem a očištěny tlakovým vzduchem. Cementové vzorky byly uloženy do uzavíratelné nádoby s deionizovanou vodou, ostatní byly vloženy do PE sáčku a stejných uzavíratelných nádob, a umístěny na 24 h do sušárny při 80 °C. Po dalších 24 h bylo provedeno první, tzv. „nulté“ měření. Následně byly vzorky v nádobách zalaty 1M roztokem NaOH, opatřeny víkem a uloženy zpět do sušárny při 80 °C. Měření délkových změn bylo provedeno po 1, 3, 5, 8 a 13 dnech, kdy zrychlená zkouška končí. V našem případě byla část vzorků ponechána v roztoku a v týdenních intervalech sledována až do 56 dnů. Kromě délkových změn byla stanovena pevnost vzorků po 13 a 56 dnech uložení v NaOH.

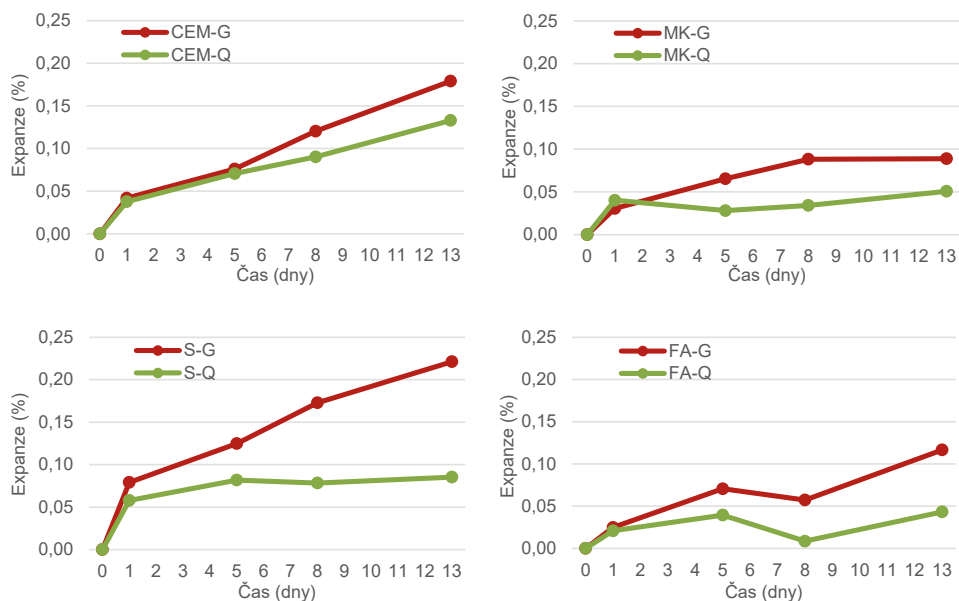
Tab. 3 Receptury zkoušených malt.

	CEM	MK	S	FA
CEM I 32,5 R (g)	650	-	-	-
Metakaolín (g)	-	450	-	-
Struska (g)	-	-	450	-
Popílek (g)	-	-	-	450
50% NaOH (g)	-	225	113,77	231,96
Vodní sklo (g)	-	450	231,03	92,78
Voda (g)	292	-	17	18,11
Kamenivo (g)	1350	1350	1350	1350

3 VÝSLEDKY A DISKUZE

Délkové změny

Expanze vzorků během zrychlené zkoušky je zobrazena v grafech na Obr. 1. Přípustnou hranici expanze 0,1 %, tedy 1 mm/m, překročily vzorky vyrobené z cementu a alkalicky aktivované strusky (u cementových vzorků překonala hranici expanze i směs se standardním křemičitým kamenivem CEM-Q, bezpečnost kameniva však byla již dříve testována i navazující dlouhodobou zkouškou na betonových trámcích, kde vzorky bez potíží vyhověly). Těsně nad touto hranicí byla i délková změna popílkových geopolymérů. Obecně je patrné, že u metakaolinové a popílkové matrice byla expanze menší než u pojiv s vyšším obsahem Ca. V dalším průběhu měření expanze dále narůstala a po 56 dnech dosáhla u všech vzorků hodnot v rozmezí 0,25–0,4 mm/m. Kromě expanze nejevily vzorky žádné trhliny ani známky jiných poruch ani po 56 dnech uložení ve zkušebních podmínkách.



Obr. 1 Délkové změny v průběhu zrychlené zkoušky maltových trámečků.

Pevnost v tlaku

Kromě délkových změn je klíčovým parametrem určujícím trvanlivost betonu při probíhající ASR jeho pevnost. V tomto případě byla sledována pevnost zkušebních těles po ukončení standardní doby zkoušky a pro porovnání také v případě, že byla tělesa ve zkušebním roztoku ponechána déle (56 dní). V Tab. 4 je uvedena změna pevnosti v tlaku dle doby uložení ve zkušebních podmínkách. Zatímco pevnost cementových malt se u obou typů kameniva nezměnila, v případě alkalicky aktivovaných malt je jasné patrné, že použitý 1M roztok NaOH pevnost ovlivňuje. Zatímco po 13 dnech je pevnost poměrně vysoká, po dalších 6 týdnech dochází i k velmi výrazným poklesům, u popílků až téměř o 50 %. Tento vývoj naznačuje, že zkušební roztok NaOH není vůči alkalicky aktivovanému pojivu inertní a ovlivňuje jeho hydrataci a pevnosti.

Tab. 4 Pevnost v tlaku malt s reaktivním kamenivem (G) po 13 a 56 dnech uložení v 1M NaOH při 80 °C.

	13 d (MPa)	56 d (MPa)	Změna (%)
CEM	44,7	45,5	2,0
MK	40,2	24,8	-38,5
S	92,4	64,3	-30,5
FA	42,6	22,2	-48,0

Vliv zkušebních podmínek

Studie zabývající se ASR u alkalicky aktivovaných látek zmiňují omezené použití této metody, která byla vyvinuta pro potřeby sledování tradičního betonu. Jedná se o problematiku přítomnosti 1M roztoku NaOH, která je diskutována nejen ve vztahu k pevnosti. Zatímco u cementu se NaOH podílí prakticky pouze na průběhu ASR, u alkalicky aktivovaných pojiv se alkálie přímo účastní tvorby pojivové matrice. Williamson [5] a Shi [10] tvrdí, že průběh ASR je z velké části dán složením pórového roztoku a počátečními podmínkami, tedy alkalickým aktivátorem. Jakékoli další alkálie z vnějšího zdroje se k povrchu reaktivního kameniva dostávají transportními procesy závislými na mikrostruktuře pojiva, která se liší od těch cementových. Rozdíl v koncentraci pórového a zkušebního roztoku může způsobit pokračující hydrataci pojiva a urychlení ASR nebo naopak vyluhování alkálií a zpomalování těchto procesů. Konkurenční procesy hydratace, ASR a vyluhování se mohou dále překrývat s účinky autogenního smršťování matrice, pro jejichž průběh je neopomenutelný také vliv zvýšené teploty.

4 ZÁVĚR

Tři typy alkalicky aktivovaných malt na bázi vysokopecní strusky, popílku a metakaolinu byly podrobeny zrychlené zkoušce rozpínání maltových trámečků v důsledku alkalicko-křemičité reakce dle německé směrnice DAFStb. Během 14 dnů uložení v roztoku NaOH při 80 °C byly měřeny délkové změny, pevnost vzorků byla stanovena po ukončení zkoušky a také po prodloužení doby uložení ve zkušebních podmínkách až do stáří vzorku 56 dnů. Povolený limit expanze 1 mm/m překročily kromě referenčních cementových trámečků struskové vzorky a těsně také popílkový geopolymery s reaktivním kamenivem. Geopolymerní pojiva z popílku a metakaolinu se však rozpínaly asi o 50 % méně než alkalicky aktivovaná struska, což odpovídá předpokladu, že zejména obsah Ca hraje v mechanismu ASR významnou roli. Problematiku použití zrychlené zkoušky pro stanovení rizika ASR u alkalicky aktivovaných pojiv ilustruje také výrazný vliv roztoku NaOH na pevnost vzorku. U cementu se totiž NaOH podílí převážně pouze na ASR, u alkalicky aktivovaných pojiv však pravděpodobně i se zvýšenou teplotou ovlivňuje samotný průběh hydratace či vývoj pevnosti. Pro tyto materiály je tedy vhodné provádět také dlouhodobá měření za podmínek, které lépe odpovídají běžnému provoznímu prostředí. Další výzkum je nutný k porozumění průběhu ASR u alkalicky aktivovaných látek a případné modifikaci krátkodobých zkušebních metod tak, aby se daly uvedené rizikové vlivy eliminovat.

Použitá zdroje

- [1] Lindgård, J., Andiç-Çakır, Ö., Fernandes, I., Rønning, T. F., & Thomas, M. D. (2012). Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing. *Cement and Concrete research*, 42(2), 223-243.
- [2] Cyr, M., & Pouhet, R. (2015). Resistance to alkali-aggregate reaction (AAR) of alkali-activated cement-based binders. In *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes* (pp. 397-422). Woodhead Publishing. Citace 2
- [3] Shi, C., Roy, D., & Krivenko, P. (2003). *Alkali-activated cements and concretes*. CRC press.
- [4] Shi, Z., Shi, C., Zhang, J., Wan, S., Zhang, Z., & Ou, Z. (2018). Alkali-silica reaction in waterglass-activated slag mortars incorporating fly ash and metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 108, 10-19.
- [5] Williamson, T., & Juenger, M. C. (2016). The role of activating solution concentration on alkali-silica reaction in alkali-activated fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, 83, 124-130.
- [6] Pouhet, R., & Cyr, M. (2015). Alkali-silica reaction in metakaolin-based geopolymer mortar. *Materials and Structures*, 48(3), 571-583.
- [7] Singh, B., & Ishwarya, G. (2019). Investigations on Aggregate Reactivity in Geopolymer Concrete. In *Recent Advances in Structural Engineering, Volume 1* (pp. 961-970). Springer, Singapore.
- [8] Krivenko, P., Drochytka, R., Gelevera, A., & Kavalerova, E. (2014). Mechanism of preventing the alkali-aggregate reaction in alkali activated cement concretes. *Cement and Concrete Composites*, 45, 157-165.
- [9] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. (2013). DAFStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie), 2013-10.
- [10] Shi, C., Shi, Z., Hu, X., Zhao, R., & Chong, L. (2015). A review on alkali-aggregate reactions in alkali-activated mortars/concretes made with alkali-reactive aggregates. *Materials and Structures*, 48(3), 621-628.

PRŮBĚH HYDRATAČNÍCH TEPLŮ PŘI KOMBINACI VYSOKOTEPLŮTNÍHO A FLUIDNÍHO ÚLETOVÉHO POPÍLKU

COURSE OF HYDRATION TEMPERATURES WHEN COMBINING HIGH- TEMPERATURE FLY ASH AND FLUIDIZED BED COMBUSTION FLY ASH

Milan Meruňka^{*,1}, Rudolf Hela¹

*merunka.m@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Veverí 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Používání vysokoteplotního úletového popílku do betonové směsi se v moderní technologii betonu stalo již běžnou záležitostí, nejen z důvodu pozitivního ovlivnění vybraných parametrů betonové směsi v jejím čerstvém i zatvrdlém stavu, ale také z ekonomického hlediska. V posledních letech ovšem stoupla poptávka po této příměsi natolik, že se z ní stává obtížně dostupná surovina a z toho důvodu je nutné hledat možné alternativy. Jedním z možných řešení by mohlo být částečné nahrazení vysokoteplotního úletového popílku popínkem fluidním. To ovšem v současné době není legislativně možné pro jeho použití jako aktivní příměsi do betonu, zejména z důvodu nevhodného chemického složení. Tento článek se zabývá studii možné optimální kombinace těchto dvou druhů popílků.

Klíčová slova

Vysokoteplotní úletový popílek, fluidní úletový popílek, hydratační teplota

Abstract

Adding high-temperature fly ash to a concrete mixture has become a common matter in modern concrete technology, not only because of the positive influence on chosen parameters of the fresh and hardened mixture, but also from an economic point of view. In recent years, however, demand for this ingredient has risen to the extent that it is becoming unavailable; thus, it is necessary to seek possible alternatives. One potential solution is the partial replacement of high-temperature fly ash with fluid fly ash. However, it is legislatively impossible to use fluid fly ash as an active admixture of concrete thus far, mainly because of its inappropriate chemical composition. This article focuses on the study of possible optimal combinations of these two types of ash.

Key words

High-temperature fly ash, fluidized bed combustion fly ash, hydration temperature

1 ÚVOD

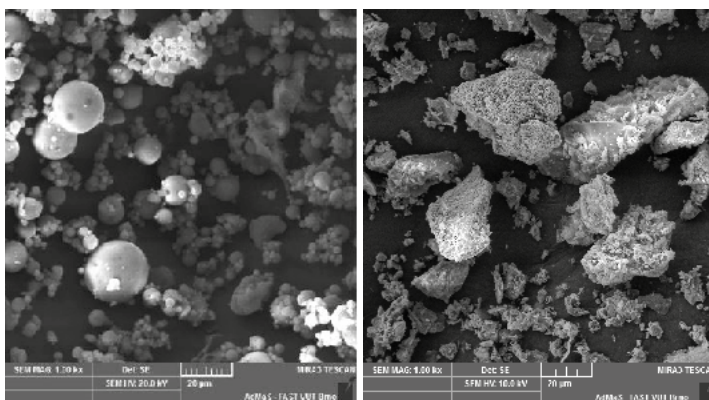
Hlavním cílem experimentu bylo zjistit vliv částečné náhrady vysokoteplotního úletového popílku popínkem fluidním na vývoj hydratačních teplot na cementových maltách. Vliv této reakce závisí na měnících se vlastnostech vstupních materiálů, proto bylo nutno před počátkem experimentu veškeré vstupní materiály pečlivě analyzovat. Vysokoteplotní úletový popílek se v technické praxi používá k rozvolnění hydratačních procesů nejen při betonáži masivních betonových konstrukcí z důvodu eliminace nepříznivých vlivů s tím spojených, například vznik smršťovacích trhlin, které mohou v delším časovém horizontu snižovat trvanlivost celé konstrukce [1], [2], [3]. Fluidní úletový popílek naopak může způsobit urychlení hydratačních procesů cementového kompozitu, zejména díky obsahu reaktivního volného vápna. Vyznačuje se ovšem nejen nevhodným chemickým složením, ale také vysokou vodonáročností danou morfologií jeho zrn a jeho chemismem, a proto prozatím při výrobě betonových směsí nebylo nalezeno jeho vhodné uplatnění. Jedním z možných řešení by se mohla jevit částečná náhrada vysokoteplotního úletového popílku právě popínkem fluidním [4], [5].

2 ANALÝZA VSTUPNÍCH SUROVIN

Cílem prvotní fáze výzkumu bylo zjistit vliv částečné náhrady vysokoteplotního úletového popílku popílkem fluidním na vývoj hydratačních teplot na cementových pastách. Pro experiment byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R z lokality Mokrá, vysokoteplotní úletový popílek z tepelné elektrárny Dětmarovice (EDE). Fluidní úletový popílek pocházel z tepelné elektrárny v Kladně (KLD). Fyzikální parametry a chemické složení vstupních surovin je shrnuto v Tab. 1.

Tab. 1 Fyzikálně-chemické složení surovin.

Surovina	Měrná hmotnost [g/cm ³]	Měrný povrch [cm ² /g]	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	Volné CaO	SO ₃	Ztráta žháním [%]
CEM I 42,5 R, Mokrá	3,11	3910	19,7	4,7	3,30	63,70	-	3,16	3,4
Dětmarovice	2,23	3205	53,9	25,2	7,13	2,79	0,13	0,49	2,0
Kladno	2,72	8580	39,7	26,8	5,66	15,10	4,25	5,25	2,1



Obr. 1 Snímky ze SEM - vysokoteplotní úletový popílek EDE - vlevo, fluidní úletový popílek KLD - vpravo.

Fotografie zrn popílků z elektronového skenovacího mikroskopu (SEM) na Obr. 1 ukazují na rozdílnost morfologie zrn vysokoteplotního a fluidního popílku. Vysokoteplotní popílky mají zrna téměř pravidelného kulovitého tvaru, kdežto u zrn popílku fluidního lze spatřovat jejich značnou nepravidlost a pórovitost. Tato skutečnost má přímý dopad na zvýšenou vodonáročnost fluidních popílků.

3 METODIKA

Vývoj hydratačních teplot byl stanoven na cementových pastách vyrobených se shodnou konzistencí. Tento postup dosažení stejné konzistence byl zvolen z důvodu přímého porovnání kombinace vysokoteplotního a fluidního popílku při praktické použitelnosti. Ačkoliv by konzistenci vyrobeného kompozitu bylo možné dále modifikovat za použití superplastifikační přísady, v rámci experimentu bylo její použití vyloučeno z důvodu eliminace dalšího parametru majícího vliv na vývin hydratační teploty. Konzistence vyrobené pasty byla stanovena za pomoci zjednodušené metody střešovacího stoku dle ČSN EN 1015-3 [6], přičemž byl naplněn obrácený kužel o výšce 3 cm, zvednutý kolmo vzhůru a po 15 rázech střešovacího stoku byl měřen průměr rozlité cementové pasty. Průměr rozlité cementové pasty byl pro všechny receptury stanoven na 150 ± 10 mm.

V rámci experimentu byla namíchána cementová pasta referenční, zcela bez popílku. Dále byly namíchány cementové pasty, ve kterých byl cement hmotnostně nahrazen z 25 %, 35 % a 50 % vysokoteplotním úletovým popílkem. U těchto směsí dále došlo k 20%, 30%, 40% a 50% hmotnostní náhradě vysokoteplotního úletového popílku popílkem fluidním.

Měření vývoje hydratačních teplot probíhalo dle ČSN EN 196 - 9 [7] za použití zkušebního zařízení od firmy Calmetrix s označením F-cal 8000 do doby, dokud nebylo dosaženo maximální hydratační teploty sledované směsi. V průběhu klesání hydratační teploty cementové pasty byl proces měření ukončen.

Způsob značení receptur vychází ze vzájemného poměru mísení jednotlivých pojivových složek, např. EDE_35:KLD_70:30 – procentuální hmotnostní náhrada cementu popílkem činí 35 % a vzájemný poměr mísení popílku EDE a KLD je 70:30 % hm.

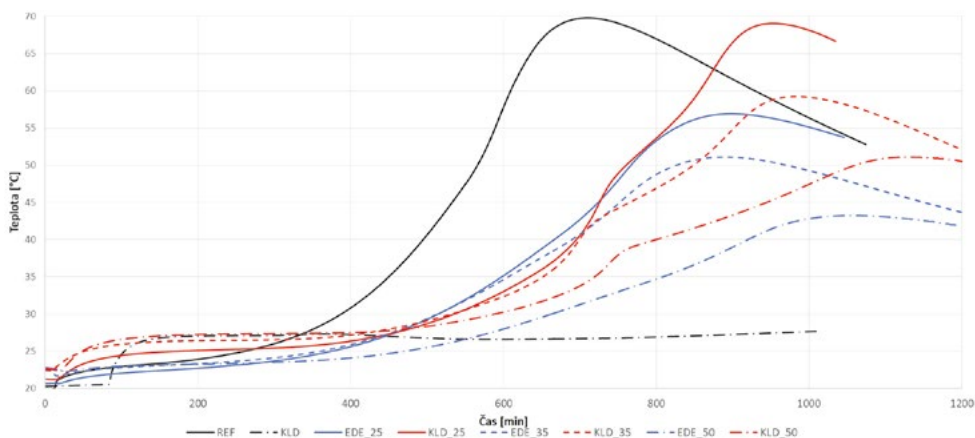
Tab. 2 Dosažení vodí součinitel cementových past a jejich rozliti.

Směs	w [-]	Ø rozliti [mm]	Směs	w	Ø rozliti [mm]
REF	0,33	150	EDE_35:KLD_80:20*	0,35	145
KLD	1,20	150	EDE_35:KLD_70:30*	0,40	145
EDE_25	0,35	155	EDE_35:KLD_60:40*	0,44	145
KLD_25	0,53	150	EDE_35:KLD_50:50*	0,47	150
EDE_25:KLD_80:20*	0,37	150	EDE_50	0,30	145
EDE_25:KLD_70:30*	0,38	150	KLD_50	0,70	145
EDE_25:KLD_60:40*	0,40	150	EDE_50:KLD_80:20*	0,38	145
EDE_25:KLD_50:50*	0,42	145	EDE_50:KLD_70:30*	0,42	145
EDE_35	0,31	150	EDE_50:KLD_60:40*	0,47	145
KLD_35	0,59	145	EDE_50:KLD_50:50*	0,52	145

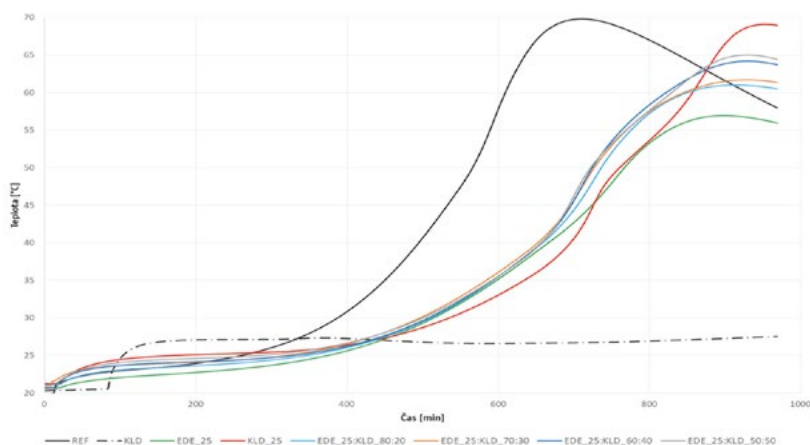
*Poměr vzájemného mísení vysokoteplotního a fluidního popílku

4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Jak znázorňuje Obr. 2, při měření vývoje hydratačních teplot cementových past bylo dle očekávání nejrychleji dosaženo maximální teploty u cementové pasty referenční, která zároveň vykazovala i nejvyšší dosaženou teplotu. S přibývajícím množstvím vysokoteplotního popílku v cementové pastě docházelo k postupnému snižování maximální dosažené teploty cementové pasty a zároveň rozvolnění hydratačního procesu, což je jedna z charakteristických vlastností vysokoteplotního popílku použitého v cementovém kompozitu jako aktivní příměsi. Se zvyšujícím se obsahem fluidního úletového popílku v cementové pastě docházelo ke zvyšování vodního součinitele směsi, který má na průběh a intenzitu hydratační reakce významný podíl. V rámci experimentu byl rovněž analyzován průběh hydratačních teplot také pouze pro fluidní popílek smíchaný s vodou, přičemž jak je z grafu zřejmé, u této směsi dochází k reakci volného vápna s vodou a dále je již teplota směsi neměnná.



Obr. 2 Vývoj hydratačních teplot cementových past bez vzájemné kombinace popílků.

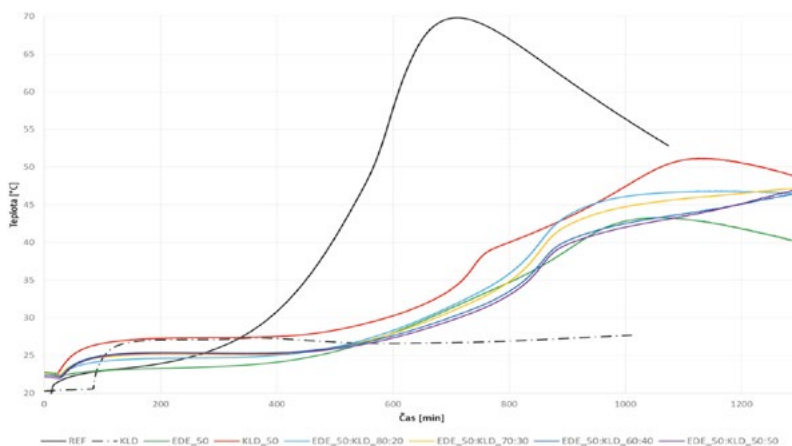


Obr. 3 Vývoj hydratačních teplot cementových past s 25% náhradou cementu vysokoteplotním popílkem EDE v kombinaci s fluidním popílkem KLD.

Jak je znázorněno na Obr. 3, cementová pasta obsahující pouze vysokoteplotní úletový popílek dosáhla nejnižší maximální teploty. Cementové pasty obsahující kombinaci vysokoteplotního úletového popílku EDE a popílku fluidního dosáhly vyšších maximálních teplot, lze se tedy domnívat, že zvýšený obsah volného CaO přispívá k intenzivnější reakci mezi hydratačními produkty. Jako nejvhodnější varianta při 25% náhradě cementu vysokoteplotním popílkem se jeví varianta, ve které je poměr vysokoteplotního popílku s popílkem fluidním 70:30 či 80:20, neboť tyto dva poměry mají téměř totožný průběh.

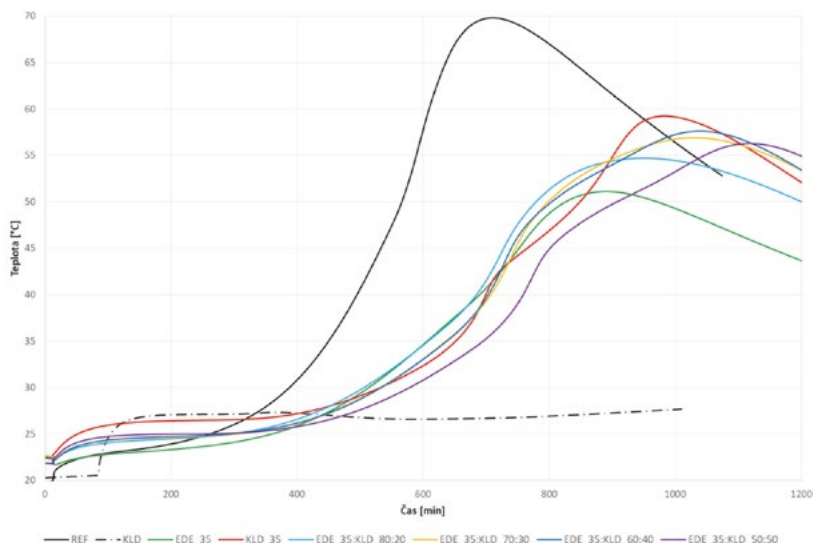
Jak je patrné z Obr 4, i při vyšší procentuální náhradě cementu vysokoteplotním popílkem EDE v kombinaci s popílkem fluidním se jeví jako nejvhodnější varianta s poměrem těchto dvou druhů popílků 80:20, případně 70:30.

Při porovnání Obr. 3 a Obr. 4 je také patrné, že se snižujícím se množstvím cementu v cementové pastě dochází k prodloužení času potřebného k dosažení maximální hydratační teploty. To je způsobeno nejen vyšším množstvím obsaženého popílku ve směsi, ale také zvyšujícím se vodním součinitelem.



Obr. 4 Vývoj hydratačních teplot cementových past s 50% náhradou cementu vysokoteplotním popílkem EDE v kombinaci s fluidním popílkem KLD.

V případě 35% náhrady cementu vysokoteplotním úletovým popílkem EDE v kombinaci s popílkem fluidním KLD byly získány obdobné výsledky s ideální kombinací těchto druhů popílků 80 : 20, případně 70 : 30, jak je patrné z Obr. 5.



Obr. 5 Vývoj hydratačních teplot cementových past s 35% náhradou cementu vysokoteplotním popílkem EDE v kombinaci s fluidním popílkem KLD.

Tab. 3 uvádí vývoj hydratačních teplot. Hodnota T_{35} udává čas, ve kterém cementová pasta dosáhla teploty 35 °C. Tato teplota byla zvolena jako referenční, protože tvoří cca polovinu maximální dosažené teploty referenční směsi a vzhledem k použitému vodnímu součiniteli odpovídá cca konci doby tuhnutí této směsi. Zároveň je patrné, že s přibývajícím množstvím fluidního popílku v cementové pastě docházelo v mnoha případech ke zvyšování maximální dosažené teploty ve velmi úzkém časovém rozmezí. Vzhledem ke zvyšujícímu se vodnímu součiniteli by se však měl čas dosažení maximální dosažené teploty výrazně zvyšovat. Lze se tedy domnívat, že s přibývajícím množstvím fluidního popílku v cementové pastě dochází k urychlení reakčních procesů vysokoteplotního popílku z důvodu obsahu volného vápna ve fluidním popílkem, které po jeho reakci s vodou zabezpečuje ve směsi chemismus nutný pro nastartování pucolánové reakce. Velmi pozitivně lze hodnotit možnost nalezení optimálního mísení vysokoteplotního a fluidního popílku na základě průběhu hydratačních teplot a tento poměr mísení není závislý na množství nahrazení cementu popílkem obecně ani na druhu použitého vysokoteplotního popílku.

Tab. 3 Dosažený vodní součinitel cementových past a jejich rozlití.

Směs	T_{35} [min]	T_{max} [°C]	Čas T_{max} [min]	Směs	T_{35} [min]	T_{max} [°C]	Čas T_{max} [min]
REF	450	69,8	710	EDE_35:KLD_80:20*	610	54,7	950
KLD	—	27,3	385	EDE_35:KLD_70:30*	635	56,9	1030
EDE_25	600	56,9	900	EDE_35:KLD_60:40*	640	57,6	1035
KLD_25	635	69,1	955	EDE_35:KLD_50:50*	695	56,3	1120
EDE_25:KLD_80:20*	595	61,0	910	EDE_50	810	43,3	1060
EDE_25:KLD_70:30*	585	61,9	930	KLD_50	720	51,1	1130
EDE_25:KLD_60:40*	595	64,2	925	EDE_50:KLD_80:20*	785	46,8	1170
EDE_25:KLD_50:50*	590	65,0	930	EDE_50:KLD_70:30*	805	47,2	1350
EDE_35	605	51,1	890	EDE_50:KLD_60:40*	825	47,0	1355
KLD_35	650	59,2	980	EDE_50:KLD_50:50*	835	49,4	1340

*Poměr vzájemného mísení vysokoteplotního a fluidního popílku

5 ZÁVĚR

Studie se zabývá vývojem hydratačního tepla cementových past s kombinací vysokoteplotního úletového popílku a fluidního úletového popílku. Fluidní úletový popílek se vyznačuje vysokou vodonáročností, a proto při zvyšujícím se množství fluidního popílku v cementové pastě, potažmo betonové směsi, dochází k postupnému

zvyšování vodního součinitele. Zvyšující se vodní součinitel v cementové pastě zvyšuje čas potřebný k dosažení maximální hydratační teploty a obecně v případě betonové směsi snižuje její výsledné fyzikálně-mechanické parametry. To lze ovšem do určité míry eliminovat použitím vhodné superplastifikační přísady, čímž by se zároveň urychlil hydratační proces.

Výsledky experimentu jednoznačně prokázaly odlišnost chování cementové pasty při odlišném poměrném zastoupení vysokoteplotního a fluidního popílku. Při sledování vývoje hydratačních teplot se jevila jako nejvhodnější kombinace vysokoteplotního a fluidního úletového popílku s 25% náhradou cementu poměr mísení 70:30, při vyšší procentuální náhradě (35 %, 50 %) se jevil nejvhodnější poměr mísení těchto dvou druhů příměsí poměr 80:20. Při těchto poměrech mísení docházelo k pozitivnímu ovlivnění průběhu hydratačního procesu vyrobených cementových past sledovaného pomocí vývoje hydratačních teplot. Z dosažených výsledků a známého chemismu hydratačních procesů lze soudit, že optimální přídavek fluidního popílku k popílku vysokoteplotnímu může mít pozitivní dopad na urychlení nastartování pucolánových reakcí vysokoteplotního popílku. Tato teorie se opírá o zastoupení volného CaO ve fluidním popílku, které po styku s vodou vytváří hydratační produkty nutné pro průběh pucolánové reakce. Optimální poměr mísení obou druhů popílků umožňuje nalézt vhodnou linii mezi negativy obou druhů popílků a pozitivem jejich kombinace – pomalý průběh pucolánové reakce vysokoteplotního popílku, vysoká vodonáročnost a nevhodných chemismus fluidního popílku.

Tento provedený experiment je prvotní fází studie uplatnitelnosti fluidního úletového popílku do betonové směsi a na základě nabytých výsledků nelze stanovit vliv mísení obou druhů popílků na fyzikální či trvanlivostní parametry kompozitu. Pro další možnosti uplatnitelnosti tohoto materiálu je nutné provést další množství experimentů a stanovit přesný vliv a možnosti použití betonové směsi obsahující tento druh příměsí.

Poděkování

Príspevek byl vytvořen v rámci řešení projektu č. FAST-J-20-6386 "Vývoj vysocoedolných betonů pro prostředí XA vyrobených za použití úletových popílků.

Použité zdroje

- [1] T. Robl, K. Mahboub, W. Stevens, R. Rathbone, Fluidized Bed Combustion Ash Utilization: CFBC Fly Ash as a Pozzolanic Additive to Portland Cement Concrete, Coventry University and The University of Wisconsin Milwaukee Centre for by-products utilization, In P. Claisse, E. Ganijian, F. Canpolat, T. Naik, Special Technical Proceedings 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Ancona, Italy, 2010.
- [2] Osuská, Lucia a Rudolf Hela. Use of fluidized bed combustion fly ash as addition reducing shrinkage of concrete. Materials Science Forum Submitted. 2016, (865), 141-144. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.865.141. ISSN 1662-9752.
- [3] ASHISH, KumerSaha. Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. Sustainable Environment Research. 2018, (28), 25 - 35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>. ISSN 2468-2039.
- [4] Ťažký, Martin a Rudolf Hela. Synergistic Effect of High Temperature Fly Ash with Fluidized Bed Combustion Fly Ash in Cement Composites. Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2017, 2016-12-01, (722), 113-118. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.865.141. ISSN 1662-9795.
- [5] LIGUO, Ma a Zhang YUNSHENG. Study on the effect of fly ash or silica fume to hydration heat of cement. Advanced Materials Research [online]. 2011, (250 - 253), 4001 - 4004. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.4001. ISSN 1662-8985.
- [6] ČSN EN 1015-3. Zkušební metody malt pro zdivo: Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím sřásacího stoku). A2. Praha: ÚNMZ, 2008.
- [7] ČSN EN 196-9. Metody zkoušení cementu: Část 9: Stanovení hydratačního tepla - Semiadiabatická metoda. Praha: ÚNMZ, 2010.

STUDIUM VLIVU KONZISTENCE NA ODOLNOST VŮČI ABRAZI BETONU

STUDY OF THE EFFECT OF CONSISTENCY TO THE ABRASION RESISTANCE OF CONCRETE

Ondřej Pikna^{*1}, Rudolf Hela¹, Martin Ťažký¹

^{*}pikna.o@fce.vutbr.cz

¹ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Trvanlivost betonu je často hlavním kritériem při navrhování současných betonů, které jsou často vystaveny působení nejrůznějších agresivních vlivů. Mezi tyto agresivní vlivy lze zařadit i působení mechanického opotřebení kompozitu vlivem abraze. Současné výzkumy a publikované studie spojené s touto tématikou se zaměřují zejména na vliv vstupních surovin na odolnost cementového kompozitu vůči abrazi. Předkládaný článek se zabývá problematikou různých způsobů zpracování betonové směsi z pohledu jeho následné odolnosti proti mechanické abrazi. Navržené betonové směsi ilustrují možné způsoby výroby betonových prvků vystavených mechanickému opotřebení abrazi, přičemž u všech jsou dodrženy srovnatelné mechanické parametry a jsou vyrobeny ze stejných vstupních surovin.

Klíčová slova

Abraze betonu, konzistence, minerální příměsi, kamenivo

Abstract

Durability of concrete is often the main criterion upon designing of up-to-date concretes against various aggressive influences. These aggressive influences may also include the effect of mechanical wear of a composite caused by abrasion. Recent researches and published studies on this topic are dealing mainly with the effect of input raw materials on the abrasion resistance of cement composite. The presented article aims on the problematics of various methods of concrete mix processing from the mechanical abrasion resistance point of view. Designed concrete mixtures illustrate the methods for production of concrete components exposed to mechanical abrasion whereas comparable mechanical parameters are consistent for all methods and the concrete are made from the same input raw materials.

Key words

Abrasion of concrete, consistency, mineral additions, aggregate

1 ÚVOD

Abraze betonu je neodmyslitelně spjata s jeho využitím při styku s vodou nebo pevnými látkami. Mechanickou abrazi mohou být degradovány všechny druhy betonu bez ohledu na způsob výroby konstrukčního prvku. V případě transportbetonu lze např. zmínit velké části dilatačních celků přehradních těle. V případě samozhutitelného betonu lze zmínit některé hustě armované celky nebo litá šachtová dna. Dalším příkladem může být prefabrikovaná výroba kanalizačních trub nebo skruží. U všech jmenovaných konstrukčních prvků dochází k opotřebení kapalnými médii ve spojitosti s unášenými pevnými částicemi.

Mnoho článků spojených s tématikou abraze se zabývá vlivem vstupních surovin a výběrem co nejdolnějších materiálů proti abrazi výsledného betonu. Cílem provedené studie je však nalézt spojitost mezi způsobem zpracování betonové směsi z pohledu její konzistence a její výsledné odolnosti proti mechanické abrazi v případě zachování vstupních surovin a mechanických parametrů [1].

2 METODIKA

Hlavním cílem experimentu bylo sumarizovat a porovnat jednotlivé technologické postupy výroby betonu odlišných konzistencí se společným cílem maximalizovat odolnost vůči abrazi betonu. Závěrem provedeného experimentu bylo objasnit vliv použité technologie zpracování betonové směsi. Návrh betonových směsí vycházel z předpokladů pro daný způsob zpracování při zachování stejných vstupních surovin. Z hlediska technologie zpracování byla měněna zejména skladba pojivové fáze kompozitu a křivka zrnitosti. Tyto skutečnosti by mohly poukázat na vliv množství zastoupení cementové malty (pojivová složka a drobné kamenivo), vzhledem k odolnosti kompozitu proti mechanické abrazi.

3 POUŽITÉ SUROVINY

Celkem byly navrženy a namíchány 3 reprezentativní receptury jednotlivých výrobních postupů s reálně předpokládanými konzistencemi. Jednalo se dle Tab. 1 o recepturu klasického transportbetonu (REF), s předpokládanou konzistencí sednutí kužele S4. Dále o recepturu samozhutnitelného betonu (SCC) (dle konzistence sednutí-rozlítím kužele: SF2) a recepturu reprezentující výrobu prefabrikovaných dílců s předpokládanou konzistencí sednutí kuželem S1 (PREFA).

Všechny receptury byly míchány za použití portlandského cementu CEM I 42,5 R z produkce závodu Mokrá a velmi jemně mleté granulované vysokopecní strusky z produkce Dětmárovice. Kamenivo bylo zvoleno těžené z lokality Žabčice. Plastifikační přísada byla použita od společnost Mapei na bázi PCE s obchodním označením Dynamon RC 730. Jednotlivé receptury jsou zobrazeny v následující tabulce.

Tab. 1 Receptury zkoušených betonů.

Návrhová pevnostní třída betonu	C 45/55	C 45/55	C 45/55
Předpokládaná třída konzistence	S4	SF2	S1
Receptura [kg/m ³]	REF	SCC	PREFA
CEM I 42,5 R Mokrá	290	280	305
Velmi jemně mletá granulovaná vysokopecní struska Dětmárovice	60	180	40
*DTK 0/4 mm Žabčice	800	830	810
*HTK 4/8 mm Žabčice	210	255	210
HTK 8/16 mm Žabčice	805	585	855
Voda	170	185	150
Superplastifikační přísada Dynamon RC 730	2,3	4,1	1,5
Vodní Součinitel [-]**	0,43	0,37	0,38

**Výpočet vodního součinitele byl proveden v souladu s normou ČSN EN 206+A1 (k-hodnota 0,9) [7]

* DTK = drobné těžené kamenivo, HTK = hrubé těžené kamenivo

Z tabulky vyplývá, že mírně vyšší vodní součinitel vykazuje receptura pro tradiční transportbeton. Rozdíly vodních součinitelů u všech směsí nejsou nijak výrazné, a proto lze předpokládat, že výše vodního součinitele nebude mít zásadní vliv na odolnost kompozitu proti mechanické abrazi.

4 VÝSLEDKY A JEJICH DISKUZE

Zkoušky na čerstvých betonech

Tab. 2 Výsledky fyzikálních zkoušek čerstvých betonů.

Receptura [kg/m ³]	REF	SCC	PREFA
Objemová hmotnost čerstvého betonu [kg / m ³]	2350	2360	2370
Sednutí (rozlítím) kužele v čase 5 min [mm]	180	680	20

Na čerstvých betonech byly v čerstvém stavu provedeny zkoušky objemové hmotnosti dle ČSN EN 12350-6 a sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2, případně sednutí rozlítím dle ČSN EN 12350-8 v čase 5 min. od namíchání směsi. Z výsledků zmínovaných zkoušek lze tvrdit, že objemová hmotnost testovaných receptur v čerstvém stavu je srovnatelná, což je dáno použitím shodných vstupních surovin [2, 3, 4].

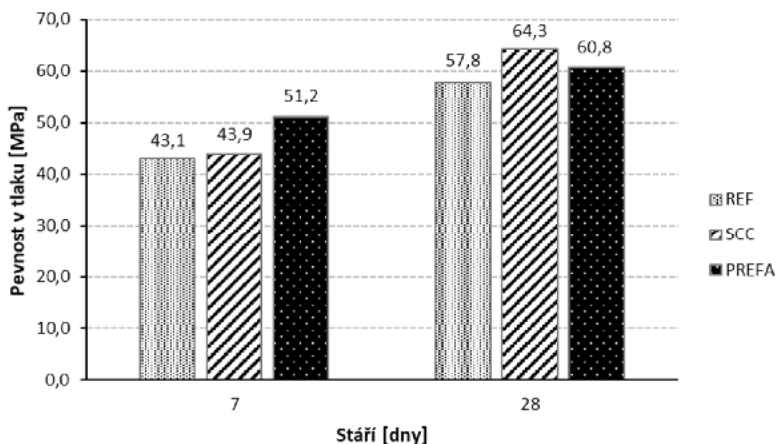
Zkoušky na zatvrdlých betonech

Tab. 3 Výsledky fyzikálně-mechanických parametrů zatvrdlých betonů.

Receptura [kg/m ³]	Stáří [dny]	REF	SCC	PREFA
Objemová hmotnost zatvrdlého betonu [kg / m ³]	7	2360	2360	2390
	28	2360	2390	2390
Nasákavost [%]	7	6,0	5,9	4,7
	28	5,6	5,7	4,7
Max. hloubka průsaku [mm]***	7	29	30	18
	28	16	8	14

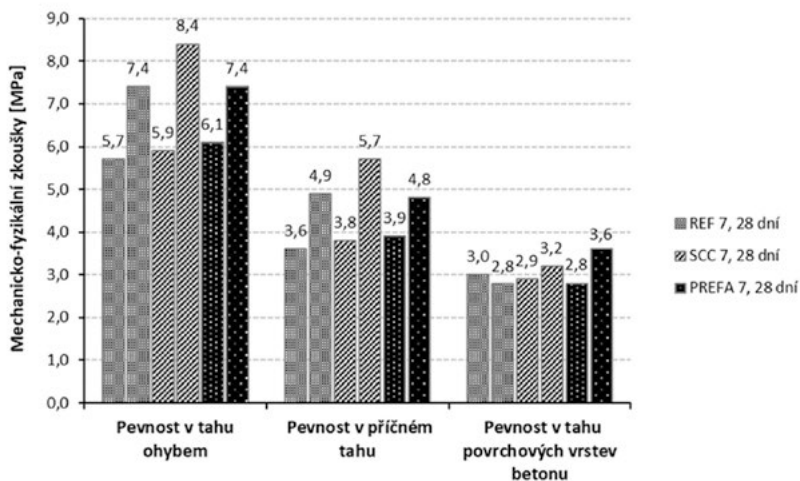
*** Namísto stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou dle ČSN EN 12390-8, byla s ohledem na vyšší požadavky provedena zkouška vodotěsnosti dle TKP ŘVC HV8 [5, 6].

U všech receptur bylo na zatvrdlých betonech provedeno stanovení vodotěsnosti betonu dle TKP ŘVC [6] na stupeň HV8 (jenž odpovídá tlaku 400 kPa po dobu 24 hod. a 800 kPa po 48 hod. následujících). Po uplynutí doby byla tělesa rozlomena kolmo na směr působení tlakové vody a stanovena maximální hloubka průsaku. Rovněž byla u všech receptur provedena zkouška nasákavosti dle ČSN 73 1316 [8]. Z prezentovaných výsledků Tab. 3 lze tvrdit, že u všech receptur dochází v čase během zrání betonu k zahušťování mikrostruktury, což je dáno zejména přítomností vysokopepce jemně mleté strusky. Tato skutečnost lze nejlépe ilustrovat u receptury SCC z pohledu maximální hloubky průsaku po 7 a 28 dnech normového zrání. Nejnižší hodnotu nasákavosti po 7 i 28 dnech vykazuje receptura PREFA, konkrétně 4,7 %. Z výsledků je patrné, že betonové dílce vyráběné ze zavlhých směsí mohou vykazovat pozitivní hodnoty nasákavosti i vodotěsnosti. Tato skutečnost se může pojit s navrženou křivkou zrnitosti a poměrným zastoupením hrubého kameniva v kompozitu, které obecně dosahuje nejnižších hodnot nasákavosti.



Obr. 1 Stanovení pevnosti v tlaku.

Ze zkoušky pevnosti v tlaku po 7 dnech je zřejmé, že receptury REC a SCC vykazují srovnatelné hodnoty. V případě receptury PREFA bylo po 7 dnech dosaženo mírně vyšších hodnot pevnosti v tlaku. U této receptury byl však předpoklad menší intenzity nárůstu pevnosti v čase. Po 28 dnech vykazují všechny receptury porovnatelné hodnoty pevnosti v tlaku, přičemž lze spatřit nejvyšší nárůst pevnosti u receptury SCC, což je dáno nejvyšší dávkou jemně mleté strusky. Z výsledků pevnosti v tlaku lze tvrdit, že odolnost betonu proti abrazi by neměla být přímo závislá na tomto parametru, protože všechny receptury vykazují hodnoty pevnosti srovnatelné.



Obr. 2 Mechanicko-fyzikální zkoušky betonů.

Hodnoty výsledků pevnosti v tahu ohybem i pevnosti v příčném tahu prakticky u všech receptur odpovídají trendům výsledků pevnosti v tlaku. Výjimku tvoří stanovení pevnosti v tahu povrchových vrstev betonu. Zde je dosaženo velmi podobných výsledků u receptury REF a SCC, zatímco u receptury, PREFA bylo dosaženo nejvyšší hodnoty 3,6 MPa po 28 dnech.

Na základě dosažených mechanických parametrů byla očekávána nejvyšší odolnost kompozitu proti mechanické abrazi u receptury SCC.

Pro testování odolnosti vůči abrazi betonu bylo zvoleno zařízení s otočným brusným kolem podle Boěhma. Toto zařízení funguje na principu obrusu vzorku pomocí brusného média práškového korundu. Samotné vyhodnocení dle EN vyjadřuje rozdíl úbytku objemu zkoušeného vzorku, zatímco ČSN 73 1324 prezentuje vyhodnocení v rozdíl úbytku hmotnosti vzorku [9].

Tab. 4 Výsledky odolnosti proti mechanické abrazi betonu.

Metoda zkoušení:	Stáří [dny]	REF	SCC	PREFA
Stanovení obrusnosti podle Böhma ΔV [cm ³ /50 cm ³]	7	12,75	13,07	11,50
	28	12,13	11,68	11,18
Stanovení obrusnosti dle ČSN 73 1324 Δm [%]	7	4,24	4,69	3,79
	28	3,83	3,87	3,10

U výsledků odolnosti proti mechanické abrazi lze pozorovat výrazné rozdíly mezi jednotlivými recepturami zejména při zkoušení po 7 dnech normového zrání. Z těchto výsledků je patrné, že nejvyšší odolností proti abrazi disponuje receptura PREFA, přičemž její odolnost je oproti ostatním recepturám vyšší až o cca 20 %. Toto procento výrazně klesá se stářím vzorku [11]. Zejména u receptury SCC je velmi patrný vliv zkvalitnění mikrostruktury díky vyššímu obsahu jemně mleté strusky jako aktivní příměsi.

Předpokladem pro zvýšení odolnosti proti abrazi betonu je podle některých autorů [12, 13] kladen důraz zejména na provedení kvalitní tranzitní zóny betonu, s čímž souvisí zejména vodní součinitel a pojivové složky, popřípadě druh kameniva [14]. Dosažené výsledky však přímo nekorespondují s tímto tvrzením. Z hlediska této teorie a dosažených mechanických parametrů by nejvyšší odolností proti abrazi měla disponovat receptura SCC. Na základě výsledků je však zřejmý spíše vliv zastoupení hrubého kameniva v kompozitu. Lze soudit, že zejména v rané fázi zrání kompozitu je hrubé kamenivo hlavním nositelem jeho odolnosti proti mechanické abrazi. V další fázi experimentu bude ověřeno, zda-li se tato závislost nesnižuje s rostoucím stářím vzorků, kdy již dochází ke zkvalitnění tranzitní zóny a obecně mikrostruktury kompozitu.

Tvrzení o závislosti odolnosti kompozitu proti abrazi a zastoupení hrubého kameniva je v přímé souvislosti se všemi dosaženými výsledky obrusnosti, kdy receptura SCC s nejmenším zastoupením vykazuje nejhorší odolnost proti abrazi, ačkoliv tato receptura vykazuje nejvyšší pevnostní parametry a nejnižší vodní součinitel. Tvrzení se rovněž opírá o skutečnost, že kamenivo vykazuje výrazně vyšší odolnost proti mechanické abrazi než samotný cementový kámen [13].

5 ZÁVĚR

Předložený článek se zabýval vlivem jednotlivých technologických výrobních postupů betonových prvků na odolnost vůči mechanické abrazi.

Bylo prokázáno, že poměrné zastoupení hrubého kameniva v kompozitu má zásadní vliv na jeho odolnost proti mechanické abrazi. Vyšší zastoupení hrubého kameniva v kompozitu zajišťuje jeho vyšší odolnost proti mechanické abrazi, což je velmi patrné zejména v rané fázi zrání kompozitu. Z pohledu technologického zpracování betonové směsi lze říci, že pro vibrolisovanou výrobu při použití zavlhklých směsí je často používání většího zastoupení hrubého kameniva na úkor kameniva drobného a pojivové složky. Naopak u SCC je nutná vyšší dávka pojivových složek a drobného kameniva. Tyto teorie dávají obraz o vyšší odolnosti betonových prvků vyrobených ze zavhlhlé směsi oproti litým prvkům z SCC. Bylo prokázáno, že vodní součinitel ani pevnostní parametry nepodávají přímý obraz o odolnosti kompozitu proti mechanické abrazi [10].

Pokračování tohoto výzkumu bude zaměřeno na stanovení mechanických parametrů a odolnosti proti abrazi s dlouhodobým zráním kompozitu.

Poděkování

Příspěvek byl vytvořen v rámci řešení projektu: FAST-J-20-6373 Studium možností stanovení odolnosti cementového kompozitu proti abrazi rychle proudící vody s pevnými částicemi.

Použité zdroje

- [1] GALVÃO, José Carlos Alves, Kleber Franke PORTELLA a Aline Christiane Morales KORMANN, ADAMIÁK, Marcián, ed. Abrasion Resistance of Materials: Abrasive Effects Observed in Concrete Hydraulic Surfaces of Dams and Application of Repair Materials [online]. Croatia, Rijeka: In Tech, 2012 [cit. 2020-11-14]. ISBN 978-953-51-6152-3. Dostupné z: doi:10.5772/27964
- [2] ČSN EN 12350-6. Zkoušení čerstvého betonu: Část 6: Objemová hmotnost. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [3] ČSN EN 12350-2. Zkoušení čerstvého betonu: Část 2: Zkouška sednutím. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [4] ČSN EN 12350-8. Zkoušení čerstvého betonu: Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlítím. Praha: ÚNMZ, 2020.
- [5] ČSN EN 12390-8. Zkoušení ztvrdlého betonu: Hloubka průsaku tlakovou vodou. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [6] BROŽOVSKÝ, Jiří, Rudolf HELA a Adam HUBÁČEK. Technické kvalitativní podmínky staveb ŘVC ČR: Provádění betonových konstrukcí [online]. 3. Praha: Ředitelství vodních cest ČR, 2017 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <http://www.rvccr.cz/informacni-servis/ke-stazeni/technicko-kvalitativni-podminky>
- [7] ČSN EN 206+A1. Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: ÚNMZ, 2018.
- [8] ČSN 73 1316. Stanovení vlhkosti, nasákavosti a vztlínivosti betonu. Praha: ÚNMZ, 1989.
- [9] ČSN 73 1324. Stanovení ohrusnosti betonu. Praha: ÚNMZ, 1972.
- [10] HOLSCHMACHER, Klaus. Hardened material properties of self-compacting concrete. Journal of Civil Engineering and Management [online]. 2004, January 2004, 10(4), 261-266 [cit. 2020-11-14]. ISSN 1392-3730. Dostupné z: doi:10.1080/13923730.2004.9636318
- [11] HORSZCZARUK,, E. Abrasion resistance of high strength fibre-reinforced concrete [online]. 6. Italy, Varenna: RILEM Publications, 2004 [cit. 2020-11-14]. ISBN 2912143748.
- [12] WANG, L., S.H. ZHOU, Y. SHI, S.W. TANG a E. CHEN. Effect of silica fume and PVA fiber on the abrasion resistance and volume stability of concrete. Composites Part B: Engineering [online]. Amsterdam: Elsevier, 2017, December 2017, 130, 28-37 [cit. 2020-11-14]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2017.07.058
- [13] SCOTT, Benjamin D. a Md SAFIUDDIN. Abrasion Resistance of Concrete – Design, Construction and Case Study. Concrete Research Letters [online]. 2015, September 2015, 6(3) [cit. 2020-11-14]. ISSN 2180-1371. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/281594259_Abrasion_Resistance_of_Concrete_-_Design_Construction_and_Case_Study
- [14] KILİÇ, A., A. TEYMEN, KARAHAN, O. ÖZCAN, F. BILIM, C. ÖZDEMİR a M. The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. Cement and Concrete Composites [online]. Amsterdam: Elsevier, 2008, 2008, 30(4), 290-296 [cit. 2020-11-14]. ISSN 0958-9465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.05.011

NÁVRH VYSOKOPEVNOSTNÍCH BETONŮ PRO TRANSPORTBETON

DESIGN OF HIGH STRENGTH CONCRETE FOR TRANSPORT CONCRETE

Milan Meruňka^{*,1}, Martin Ťažký¹, Klára Křížová¹

*merunka.m@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Vysokopevnostní beton je cementový kompozit dosahující zejména vysokých pevností v tlaku, konkrétně dle legislativy vyšších než 60 MPa v případě krychelné pevnosti. Vývoj vysokopevnostních betonů převyšujících 100 MPa je stále aktuálním tématem a výroba těchto betonů je stále často omezená pouze na prefabrikaci. Moderní stavební průmysl a projektová činnost se však začíná orientovat na stavbu staticky náročných budov. V rámci příspěvku je popsán proces vývoje transportbetonů o pevnosti okolo 100 MPa určených dle projektové dokumentace pro reálnou výstavbu výškové stavby o výšce až 160 metrů a 46-ti podlažích a vliv druhu kameniva na výslednou pevnost kompozitu.

Klíčová slova

Vysokopevnostní beton (HSC), mikrosilika, cementový kompozit, zpracovatelnost

Abstract

High-strength concrete is cement composite achieving in particular high compressive strengths, specifically according to legislation more than 60 MPa in the case of cubic strength. The development of high – strength concrete exceeding 100 MPa is still an actual topic and the production of these concretes is still often limited to prefabrication only. The modern construction industry and project activity starts to orient on the construction of statically demanding buildings. Within the contribution is described the process of development of transport concrete with strength around 100 MPa determined according to the project documentation for the real construction of high – rise building around 160 metres high and with 46 floors and the influence of the type of aggregate.

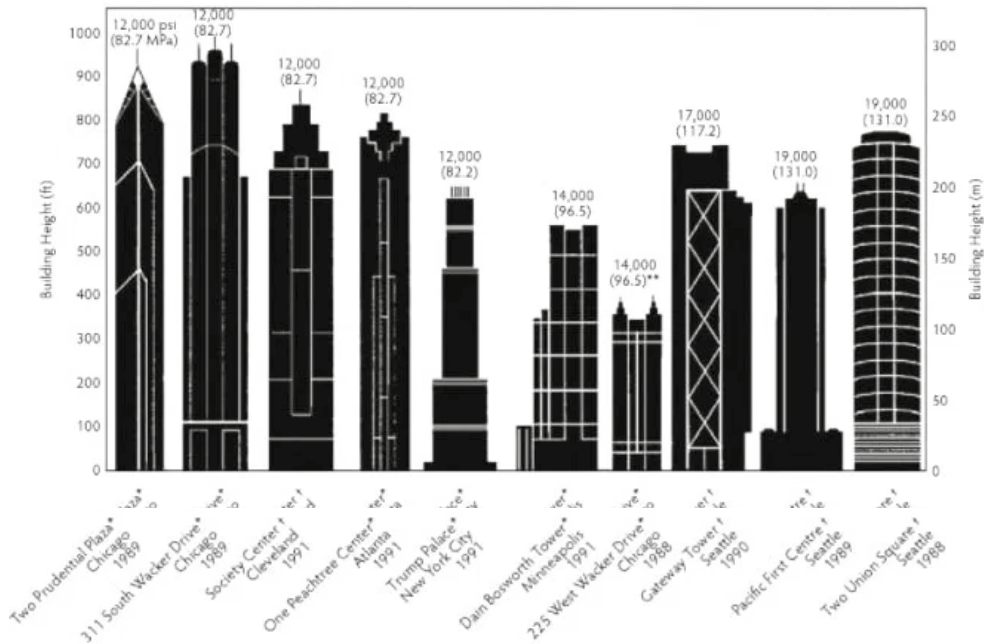
Key words

High-strength concrete (HSC), microsilica, cement composite, workability

1 ÚVOD

Jako vysokopevnostní beton (HSC) lze označit kompozitní materiál převyšující pevnostní třídu C50/60 podle ČSN EN 206+A1 [1]. Tento kompozitní materiál však často nedosahuje pouze vyšších hodnot pevnosti v tlaku, proto se lze běžně setkat s jeho označením rovněž jako vysokohodnotný beton (HPC). Využitelnost těchto druhů betonů je dána zejména možností následné výstavby staticky náročných konstrukcí. Historie využití vysokopevnostních betonů je známá již cca 50 let [2]. Specifikum výroby vysokopevnostních betonů je však podmíněno zejména výrobou moderních druhů superplastifikačních přísad. Rozmachu využití vysokopevnostních betonů v zemích České a Slovenské republiky stále brání jejich vysoká pořizovací cena a možné výrobní a transportní problémy. Světově produkce betonů s pevností okolo 100 MPa však narůstá, což je dáno zejména rozvojem výstavby výškových budov a mostů překlenujících velké rozpony. Díky využití HSC je možné navrhovat subtilnější konstrukce, díky čemuž dochází nejen ke snížení váhy konstrukce, ale rovněž ke zvětšení užitečných podlahových ploch v případě obytných staveb. Ačkoliv cena vysokopevnostních betonů značně převyšuje cenu klasických transportbetonů s pevností do 60 MPa, je díky výstavbě subtilnějších konstrukcí spotřebováno výrazně menší množství materiálů, což může do jisté míry ekonomickou náročnost vyrovnávat.

Následující ilustrativní Obr. 1 podává průřez významnými stavbami z HSC ve světě včetně přibližně dosažených pevností použitých betonů [3].



Obr. 1 Ilustrativní obrázky významných světových staveb z HSC (v závorce pevnost betonu v tlaku).

Z přiloženého obrázku je zřejmé, že se jedná o výstavbu výškových budov v 90. letech 20. století. Mezi moderní stavby lze poté jmenovat rovněž mostní konstrukce. Typickým příkladem takové stavby je Viadukt Millau uvedený ve Francii do provozu v roce 2004 [4]. Délka tohoto mostu činí téměř 2500 metrů a jeho výška až 246 metrů. Pro stavbu pilířů této mostní konstrukce byl užit vysokopevnostní beton převyšující pevnost v tlaku po 28 dnech 165 MPa [5]. Na Obr. 2 je fotografie této konstrukce [6].



Obr. 2 Ilustrativní fotografie mostní konstrukce Viaduktu Millau [6] - vlevo, (b) Ilustrativní fotografie mostní konstrukce Trojský most [8] - vpravo.

V České republice je typickým zástupcem stavby, pro jejíž konstrukci bylo užito betonu převyšující pevnost 100 MPa Trojský most v Praze [7], jehož ilustrativní obrázek je rovněž na Obr. 2 [8]. Mezi nejnovější aktuálně probíhající výstavbu z HSC v okolních zemích lze jmenovat projekt Eurovea II v Bratislavě, konkrétně první obytný mrakodrap na území Slovenské republiky Eurovea Tower [9].

2 PRINCIP NÁVRHU VYSOKOPEVNOSTNÍHO BETONU

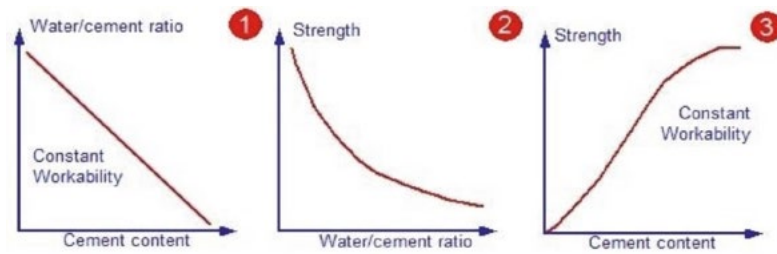
Návrh vysokopevnostního betonu se opírá obecně o teorii dosažení co nejnětnější struktury matrice. Toho je dosaženo výraznou redukcí vodního součinitele, optimální skladbou matrice z pohledu zastoupení jednotlivých

frakcí kameniva, ale rovněž pojivových složek a v neposlední řadě využitím minerálních příměsí umožňujících další vytvrzování matrice během zrání kompozitu. Zejména z pohledu dávkování a využití různých druhů pojivových složek je návrh vysokopevnostních betonů značně odlišný od návrhu klasických betonů. Pro výrobu vysokopevnostních betonů se používá téměř výhradně portlandský cement CEM I 42,5 nebo 52,5, jehož dávky však značně převyšují běžné dávky pro klasické betony. Obecně lze říci, že dávka cementu silně převyšuje jeho pojivové schopnosti a značná část z této dávky tvoří v kompozitu nereaktivní mikroplnivo. Tohoto principu je využíváno z důvodu vysoké pevnosti zrn cementu, která i bez jejich chemické reakce tvoří velmi kvalitní mikroplnivo. U HSC betonů není důležitý návrh pouze optimální křivky zrnitosti kameniva, ale rovněž křivky zrnitosti jemných složek kompozitu od velikosti cca 125 μm [10]. Další hojně využívanou pojivovou složkou je křemičitý úlet, který je velmi reaktivní pucolánovou minerální příměsí. Použití této příměsí opět slouží k tvorbě optimální křivky zrnitosti celého kompozitu, ale rovněž díky jejímu chemismu napomáhá k dalšímu vytvrzování struktury kompozitu zejména díky tvorbě vznikajících CSH a CAH gelů.

Ačkoliv je voda v betonu nezbytnou součástí pro průběh hydratačních reakcí cementu a dalších aktivních minerálních příměsí její obsah při návrhu vysokopevnostního betonu je silně redukován pomocí vysoce účinných superplastifikačních přísad. Díky tomuto druhu přísad je možné vodní součinitel kompozitu redukovat až na hranici okolo 0,2. Přestože je takto nízký vodní součinitel jedním z důvodů nekompletní hydratace všech zrn cementu, přináší jeho výrazné ponížení významný dopad na výsledné mechanické parametry kompozitu zejména z důvodu zamezení tvorby mikropórů a kapilár vznikajících při odchodu přebytečné vody z kompozitu. Rovněž nejcitlivější místo kompozitu z pohledu jeho výsledných mechanických parametrů, kterým je tranzitní zóna mezi zrny kameniva a cementovým kamenem, vykazuje díky silné redukcí vodního součinitele výrazně lepší vlastnosti. U výroby tradičních betonů vykazuje tranzitní zóna často výrazně vyšší pórovitost než okolní cementový kámen, což je dáno vyšším vodním součinitelem této zóny v okolí kamene díky vrstvě vody, která na samotném zmu kameniva ulpívá [11].

Vysoké dávky pojiv společně s výraznou redukcí vodního součinitele jsou častým důsledkem výroby kompozitu nevhodných reologických vlastností. Obecně lze říci, že tyto kompozitní materiály jsou náchylné na jejich lepivost, což může činit značné problémy během jejich výroby, transportu i ukládky. Vyjma ekonomické hledisko je právě tato skutečnost častým mezníkem pro větší uplatnitelnost vysokopevnostních betonů v praxi, zejména poté pro výrobu transportbetonů. Ma-li být kompozit bezproblémově použitelný ve stavební praxi jako transportbeton musí být zajištěna jeho dobrá zpracovatelnost, často po dobu minimálně 120 minut.

Popsané skutečnosti s ohledem na vodní součinitel a jeho dopad na pevnost kompozitu a reologii směsi zobrazuje následující ilustrativní Obr. 3 [12].



Obr. 3 Ilustrativní grafy problematiky vodního součinitele a dávky cementu u HSC [12].

3 EXPERIMENT

V rámci laboratorního a následného provozního ověření byly navrženy vysokopevnostní betony v souladu s ČSN EN 206+A1 o pevnostních třídách C80/95 a C90/105, které byly navrženy jako transportbetony se stupněm sednutí kužele S4 a dobou zpracovatelnosti 120 minut. Pro výrobu betonů bylo použito následujících surovin:

- Portlandský cement CEM I 42,5 R
- Křemičitý úlet – mikrosilika
- Aktivní příměs na bázi vysokopecní strusky a popílku
- Těžené kamenivo 0-4, 4-8 a 8-16 mm – na bázi křemenných štěrků
- Drcené kamenivo 8-16 mm – na bázi melafýru
- Superplastifikační přísada

Experimentálně byla ověřena nejen výroba betonů předepsané pevnostní třídy, ale rovněž dopad použitého druhu hrubého kameniva o frakci 8-16 mm, konkrétně dopad použití kvalitního drceného a těžného kameniva. Tento dopad byl pozorován výrobou shodných kompozitů při zachování shodných křivek zrnitosti směsi kameniva a neměnného složení.

U vyrobených betonů byl kladen důraz zejména na jejich použitelnost jako transportbetonu, tedy na minimalizaci rizika lepidlosti a prodlouženou dobu zpracovatelnosti až 120 minut při zachování stupně konzistence sednutím kužele S4 dle ČSN EN 12 350-2 [13]. Navržené betony budou dle předpokladu použity při výstavbě prvního obytného mrakodrapu na Slovensku Eurovea Tower a z důvodu ochrany osobního vlastnictví nelze dané receptury přesně publikovat. Náhled složení vysokopevnostních betonů obsahuje následující Tab. 1. Receptury vyrobené s frakcí kameniva 8-16 mm těžného druhu obsahují ve svém názvu písmeno M (mined) a s frakcí kameniva 8-16 mm drceného druhu písmeno C (crushed).

Tab. 1 Složení vysokopevnostních transportbetonů.

Surovina/Třída betonu	C80/95_M	C80/95_C	C90/105_M	C90/105_C
Pojivová složka [kg]*	558	558	633	633
Vodní součinitel [-]	0,27	0,27	0,27	0,27

*Pojivová složka kompozitů je vypočítána z dávky cementu a za použití k-hodnoty aktivních přísad dle EN 206+A1

Následující Tab. 2. a Tab. 3. obsahují dosažené výsledky mechanických parametrů vyrobených transportbetonů, které byly zkoušeny ve stáří 2, 7, 28 a 56 dní. Vyjma pevnostních parametrů byly u betonů navíc sledovány při stáří 28 dní další fyzikálně-mechanické parametry, jako je vodotěsnost a nasákavost mající přímý dopad na trvanlivost kompozitu.

Tab. 2 Vlastnosti vysokopevnostních transportbetonů v čerstvém stavu.

Vlastnost/Třída betonu	C80/95_M	C80/95_C	C90/105_M	C90/105_C
Objemová hmotnost ČB [kg/m³]	2420	2450	2420	2430
Sednutí [mm]	5 minut	210	200	210
	120 minut	200	200	200
Teplota ČB [°C]	5 minut	21,5	21,4	21,6
	120 minut	23,3	23,2	23,7

Z výsledků uvedených v Tab. 2. je patrné, že díky správně navrženému druhu superplastifikační přísady bylo možné vyrobit vysokopevnostní betony s nízkým vodním součinitelem a vysokou dávkou pojivové složky o sednutí kužele až 210 mm. Tato hodnota sednutí kužele zůstávala prakticky neměnná i po 120 minutách od výroby směsí. Tyto výsledky prokazují možnost výroby vysokopevnostních betonů s pevností až okolo 100 MPa bez problémů použitelných jako transportbeton a vyrobitelných na běžných betonárnách.

Tab. 3 Fyzikálně-mechanické parametry vyrobených vysokopevnostních transportbetonů.

Vlastnost/Třída betonu	C80/95_M	C80/95_C	C90/105_M	C90/105_C
Objemová hmotnost ZB [kg/m³]	2 dny	2420	2450	2420
	7 dní	2430	2430	2420
	28 dní	2420	2450	2430
	56 dní	2420	2440	2420
Pevnost v tlaku [N/mm²]	2 dny	61,3	66,2	59,1
	7 dní	80,0	84,5	79,8
	28 dní	94,2	105,9	100,4
	56 dní	99,3	109,3	109,6
Pevnost v tahu za ohybu [N/mm²]	28 dní	8,1	8,6	8,3
Hloubka průsaku [mm]	28 dní	3	2	4
Nasákavost [%]	28 dní	3,5	3,3	2,8

* Při zkoušce pevnosti v tahu ohybem bylo použito zatěžování dvěma břemeny

Výsledky mechanických parametrů vyrobených vysokopevnostních transportbetonů jednoznačně poukazují na vliv použitého druhu kameniva. Bylo prokázáno, že záměna hrubého těžného kameniva frakce 8–16 mm převážně křemičitého druhu za drcené kamenivo stejné frakce na bázi melafyru může významně napomoci ke zvýšení pevnostních charakteristik kompozitu. Toto navýšení v rámci experimentu z pohledu pevnosti v tlaku

po 28 dnech činí až 12 %, což je hodnota u betonů s pevností okolo 100 MPa již velmi významná. Z pohledu hodnoty pevnosti betonu v tahu ohybem může tato záměna přinést zvýšení sledovaného parametru až o 5 %.

Ačkoliv bylo pro experiment použito velmi kvalitní těžené kamenivo, byla jeho funkce z pohledu výsledné pevnosti kompozitu v tlaku vyčerpána a pro výrobu betonů vyšších pevností by již musely být jeho hrubé frakce nahrazeny kvalitním drceným kamenivem. Tato skutečnost je vyjma samotnou pevností použitého kameniva dána zřejmě jeho možností zakomponování do matrice kompozitu. Lze předpokládat, že výrazně větší povrch drčených kameniv oproti kamenivům těžným umožňuje jeho lepší zakomponování do matrice, což má za důsledek zvýšení pevnosti celého kompozitu.

Všechny vyrobené betony disponují dle předpokladu velmi nízkou hodnotou nasákavosti a hodnotou hloubky průsaku tlakovou vodou. Z těchto výsledků lze předpokládat dobrou odolnost betonů proti agresivním vlivům. Vysoká hutnost matrice kompozitu má obecně za důsledek vysokou odolnost proti pronikání agresivních médií, díky čemu je zajištěna dobrá trvanlivost kompozitu.

4 ZÁVĚR

V rámci příspěvku byly představeny možnosti výroby vysokopevnostních betonů s pevností převyšující 100 MPa po 28 dnech určených pro výrobu jako transportbeton. Bylo prokázáno, že správný výběr superplastifikační přísady je rozhodujícím pro výsledné reologické chování kompozitu, které je v případě vysokopevnostních betonů vždy negativně ovlivněno vysokou dávkou pojivové složky a nízkým vodním součinitelem. Oba zmíněné parametry mají za důsledek výraznou lepivost výsledné směsi, která je pro použití těchto HSC jako transportbetonu zcela nežádoucí. Laboratorně i provozně bylo ověřeno, že HSC vyrobené s použitím vhodné superplastifikační přísady vykazují dobrou zpracovatelnost i po 120 minutách od jejich výroby, což je důležitý aspekt z pohledu jejich ukládky. V rámci experimentu byla ověřena zpracovatelnost směsi metodou sednutí kužele, která činila až 210 mm.

Byl sledován vliv záměny hrubé frakce kameniva 8-16 mm těžného druhu za kvalitní kamenivo stejné frakce drčené. Výsledky jednoznačně prokazují, že pro výrobu betonů převyšujících 100 MPa se jeví jako vhodnější použití kvalitních drčených kameniv. Díky této ověřené záměně bylo dosaženo zvýšení pevnosti betonu v tlaku po 28 dnech až o 12 %. Takto výrazně zvýšení pevnosti v tlaku je u HSC velmi pozitivní v případě, že nedochází k dalšímu navýšování ekonomicky velmi náročné pojivové složky.

U všech vyrobených betonů byla dosažena již po 2 dnech normového zrání pevnost v tlaku okolo 60 MPa, díky čemuž už po 2 dnech byla překonána hranice pevnosti pro vysokopevnostní beton, a tato pevnost se dále výrazně zejména díky použití velmi aktivní mikrosiliky zvyšovala.

Provedený experiment je obrazem přímé poptávky stavební praxe, kdy provedený vývoj vysokopevnostních transportbetonů bude dále dle předpokladu přímo použit při stavbě prvního obytného mrakodrapu na území Slovenské republiky dosahující výšky až 160 metrů.

Poděkování

Příspěvek byl vytvořen v rámci řešení projektu č. FAST-S-20-6156 “Využití vysocehodnotných HPC betonů v současném stavitelství”.

Použité zdroje

- [1] ČSN EN 206+A1. Beton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. 2018
- [2] NAGATAKI, S., High-Strength Concrete in Japan: History and Progress, Symposium paper, Volume 167, 1997, Pages 1-26
- [3] NORMAL CONCRETE VS HIGH-STRENGTH CONCRETE PROPERTIES AND DIFFERENCES. Q Green Tech [online]. 1-5 [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: <https://qgreentech.com/normal-concrete-vs-high-strength-concrete/>
- [4] ROSS, F., F. SCHROETER a M. BUONOMO. Das grosse Viadukt von Millau - Stahlbau und Montage mit hochfesten Feinkornbaustaehlen / The Millau Viaduct - Steel construction, fabrication and erection with high-strength fine grain steel. Stahlbau. 2010, 5(74), 313-318.
- [5] HAJAR, Z., T. THIBAU, A. SIMON a P. WYNIIECKI. Construction of an Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete thin-shell structure over the Millau Viaduct toll gates. Concrete Structures. 2004, 236-237.
- [6] KOBZA, J. Viadukt Millau – koncepce a realizace projektu. ASB-portal [online]. 2008, (Inženýrské stavby - mosty) [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/inzenyrske-stavby/mosty/viadukt-millau-koncepce-a-realizace-projektu>

-
- [7] VITEK, Jan L., R. BROZ, P. KOUKOLIK a A. TVRZ. CONSTRUCTION OF THE NEW TROJA BRIDGE WITH FOCUS ON CONCRETE STRUCTURES. Beton TKS: Mosty a dopravní stavby. 2013, 2013(4), 32-42.
- [8] Trojský most Praha. In: Dronavision [online]. Praha [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: <https://www.dronavision.cz/galerie-vvc?lightbox=datatem-jatthcra1>
- [9] Eurovea Tower. Eurovea Tower [online]. Bratislava, 2020 [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: <https://euroveatower.com/>
- [10] TAZKY, M.; HELA, R., Development of structural concrete with fly ash - mixing of different particle-size fractions of fly ash and cement, Fly ash - properties, analysis and performance, ISBN 9781536105162, Nova Publisher, Inc., New York, USA, 2017
- [11] A. ELSHARIEF, M. D. COHEN, J. OLEK, Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone, Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 11, 2003, Pages 1837-1849, ISSN 0008-8846
- [12] Factors Effecting Strength of Concrete. The Constructor: Civil Engineering Home [online]. 2014 [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: <https://theconstructor.org/concrete/factors-affecting-strength-of-concrete/6220/>
- [13] ČSN EN 12350-2. Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím, 2020

SÚČASNÉ POZNATKY O MIKROBIOLOGICKY VYVOLANEJ KORÓZII BETÓNU V KANALIZAČNÝCH KONŠTRUKCIÁCH: PREHĽAD HODNOTIACICH METÓD

CURRENT UNDERSTANDING ON MICROBIOLOGICALLY INDUCED CORROSION OF CONCRETE IN SEWER STRUCTURES: A REVIEW OF THE EVALUATION METHODS

Miriama Hološová^{*,1}

*miriama.holosova@tuke.sk

¹Stavebná fakulta, Technická Univerzita v Košiciach, Vysokoškolská 4, 042 00 Košice

Abstrakt

Mikrobiologicky vyvolaná korózia (MIC) je veľkou výzvou pre vedcov vo svete pri riešení problematiky trvanlivosti betónových kanalizačných konštrukcií. Pre riešenie problému je dôležité mať prehľad o súčasných vedeckých poznatkoch vo väzbe na vývoj nových materiálov a testovacích metód. Tento príspevok je zameraný na prehľad súčasného stavu v oblasti používaných metód hodnotenia MIC betónov v kanalizačnom prostredí. Na hodnotenie vlastností betónových materiálov vystavených kanalizačným podmienkam sa používajú rôzne metódy, ako napr. chemické testy s použitím roztokov minerálnych kyselín alebo síranových solí, laboratórnych simulačných testov, experimentálnych reaktorov a expozičných testov in-situ. V práci sú porovnané hlavné výhody a nevýhody navrhovaných hodnotiacich testovacích metód.

Klíčovú slova

Mikrobiologicky vyvolaná korózia, betónové kanalizácie, hodnotiace metódy

Abstract

Microbiologically induced corrosion (MIC) is a major issue for scientists around the world in the terms of durability of concrete sewer structures. To solve the problem, it is very important to have an overview of current scientific knowledge in relation to the development of new materials and test methods. This paper is focused on an overview of the current state in the field of methods used to evaluate the MIC of concrete in the sewer environment. Various methods are used to evaluate the properties of concrete materials exposed to sewage conditions, including chemical tests using mineral acid or sulphate salt solutions, laboratory simulation tests, experimental reactors, and in-situ exposure tests. The main advantages and disadvantages of the proposed evaluation test methods are compared.

Key words

Microbiologically induced corrosion, concrete sewers, evaluation methods

1 ÚVOD

Infraštruktúra miest je tvorená aj kanalizačnými sieťami, ktoré sú vystavené vysoko agresívnemu mikrobiálnemu prostrediu, ktoré spôsobuje degradáciu betónového kanalizačného materiálu. Celková dĺžka kanalizačných sietí v krajinách ako napr. USA, Veľká Británia, Nemecko, Čína a Japonsko presahuje obvod Zeme desaťkrát a viac [1]. Ekonomické straty spôsobené mikrobiálne vyvolanou koróziou betónu sú obrovské, napr. odhadované náklady na ošetrovanie v USA sa odhadujú za 20 rokov na približne 390 miliárd dolárov [2]; zatiaľ čo v Nemecku sa ročné náklady na ošetrovanie odhadovali na 450 miliónov EUR [3]. Okrem hospodárskych strát sa čoraz viac pozornosti upriamuje aj na zdravie a životné prostredie ovplyvnené MIC.

Ide o dlhodobu riešenú problematiku, ktorej sa venujú vedci z celého sveta, avšak ešte sa nepodarilo vytvoriť natoľko odolný materiál, ktorý by nepodliehal v čase účinkom agresívneho prostredia. V súčasnosti sa kladie dôraz

na rôzne aspekty, napr. mikroorganizmy detegované v prostredí korózie odpadových vôd [4], geopolyméry pre aplikácie v odpadových vodách [3] a využitie nanotechnológií [4]. Vyvíjajú sa rôzne testovacie metódy a mechanizmy pre skúmanie vhodnej receptúry na zvyšovanie odolnosti a trvanlivosti materiálu, nakoľko nejde len o vedeckú otázku materiálovej chémie. Cieľom tejto práce je poskytnúť prehľad moderných metód, zameraných na problematiku MIC a hodnotenie stupňa degradácia betónu vystaveného kanalizačnému prostrediu.

2 CHARAKTERISTIKA METÓD HODNOTENIA

Pre potreby hodnotenia vplyvu MIC na betóny nie je vytvorená štandardná skúšobná metóda. V praxi sa používajú preto rôzne metodologické postupy na hodnotenie vlastností betónových materiálov vystavených podmienkam v kanalizačných potrubiach. Hodnotiace metódy možno rozdeliť do nasledujúcich skupín: (1) Chemické testy s použitím roztokov minerálnych kyselín alebo síranov; (2) Laboratórne simulačné testy; (3) Experimentálne reaktory; (4) Expozičné testy in-situ.

Chemické testy

Testy vykonávané ponáraním vzoriek do minerálnej kyseliny sírovej poskytujú pomerne zjednodušenú cestu k skúmaniu odolnosti betónových materiálov voči agresívnemu prostrediu, zatiaľ čo biologické testovanie je komplikovanejšie, nakoľko trvá oveľa dlhšiu dobu zistiť akékoľvek zmeny, resp. rozdiely medzi materiálmi. Tieto testy však nie vždy odrážajú reálne poškodenie vyvolané MIC. Navyše, je zložité porovnať výsledky získané v rôznych štúdiách, čo môže čiastočne vysvetliť veľké rozdiely alebo dokonca protichodné výsledky uvádzané v literatúre. Medzi hlavné faktory, ktoré ovplyvňujú výsledky testov v kyseline, patria napr.: úprava vzoriek, koncentrácia kyseliny, odstránenie koróznej vrstvy pred meraním, geometria testovacích vzoriek a iné.

Vzorky s nízkou saturáciou zvyknú absorbovať vodu a získavať hmotnosť v počiatočnom štádiu takže je ťažké posúdiť či dôjde k degradácii, ak sa za indikátor považuje strata hmotnosti. Cykly vlhčenia a sušenia počas testovania odolnosti voči kyseline sírovej môžu viesť k zvýšenému poškodeniu.

Koncentrácia kyseliny môže významne ovplyvniť proces korózie zmenou rozpustnosti hydratačných produktov. Už v jemne kyslých roztokoch možno uvažovať s degradáciou, nakoľko dochádza k vylúhovaniu vápenatých iónov. Vo vysoko kyslých podmienkach okrem rozpúšťania $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dôjde taktiež k odvápnovaniu menej rozpustných hydratačných produktov ako napr. hydráty kremičitanu vápenatého (C-S-H) a sulfoaluminátov. Pri ešte vyššom pH roztoku sa môžu rozpúšťať aj amorfné hydratované oxidy SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 . Ďalší faktor, ktorý ovplyvňuje koróziu je „aktívny“ alebo „pasívny“ kyselinový atak. „Pasívny atak“ sa týka vystavenia nemennému množstvu netečúcej kyseliny; zatiaľ čo „aktívny atak“ možno definovať tak, že sa kyselina dopĺňa alebo cirkuluje s cieľom udržania rovnakej koncentrácie po celú dobu testovania. MIC betónu je považovaný za „aktívny atak“.

Odstránenie koróznej vrstvy z povrchu vzoriek, napr. kefovaním alebo opláchnutím, môže významne ovplyvniť výsledky skúšky, keď sú ako indikátor pre degradáciu uvažované zmeny hmotnosti alebo objemu. Odstránenie koróznej vrstvy má vplyv aj na rýchlosť ataku pri opätovnom vystavení vzorky kyseline.

Čo sa týka geometrie vzoriek, Mnoho štúdií zohľadňuje stratu hmotnosti ako indikátor pre určovanie degradácie materiálu. Nakoľko je povrchová plocha vzorky vystavená roztoku kyseliny, stáva sa dôležitým parametrom.

Okrem síranovej kyseliny možno použiť aj iné minerálne kyseliny pre účely testovania ako napríklad kyselinu chlorovodíkovú, kyselinu octovú, dusičnú. Roztoky síranových solí sa v zrýchlených testoch používajú najmä z dôvodu, že betónovú koróziu kanalizácií spôsobuje síranový atak. Avšak, je rozdiel medzi síranovým atakom a atakom síranovej kyseliny, kedy sa na chemickej korózii musí podieľať kyselina sírová [4].

Laboratórne simulačné testy

V laboratórnych podmienkach boli navrhnuté rôzne simulačné komory a testovacie postupy na simuláciu podmienok v reálnych potrubiach.

Hamburská komora

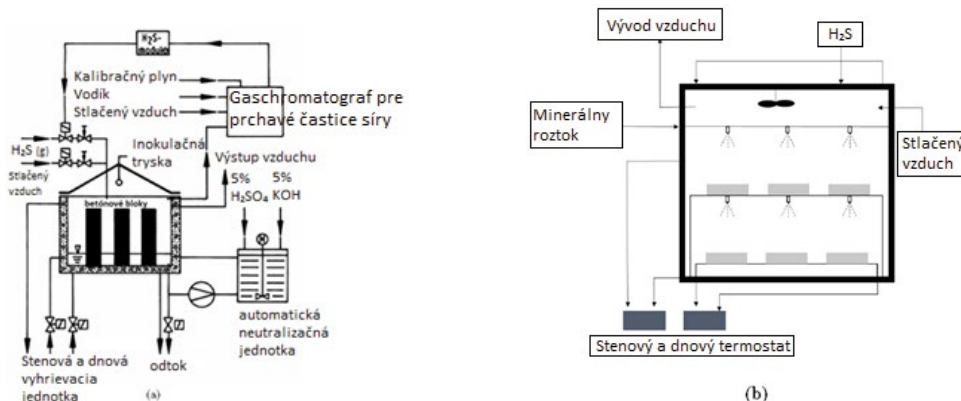
Pôvodná hamburská komora bola vyvinutá na základe pozorovaní korózie v kanalizáciách v Nemecku. Betónové vzorky s rozmermi $60 \times 11 \times 7$ cm sú uložené v 10 cm vodnom roztoku s hornými časťami vopred rozrezanými na malé kocky ($1,8 \times 1 \times 2$ cm) pre účely odberu vzoriek a monitorovania. Plynný sulfán H_2S je v komore udržiavaný v koncentrácii 10 ± 1 ppm a experimenty prebiehajú pri 30°C a relatívnej vlhkosti vyššej ako 95 %. Baktérie

oxidujúce síru napr. Thiobacillus, sa kultivovali a nastriekali na konkrétne vzorky z trysiek na strope. Rýchlosti korózie v komore sa odhadujú na 8-násobok rýchlosti pozorovanej v teréne [4].

Ehrich a kol. upravili pôvodnú hamburskú komoru tak, aby bolo možné vyhodnotiť vzorky malty s veľkosťou $2 \times 2 \times 2$ cm. Koncentrácia plynného H_2S bola udržiavaná na 105 ppm. Z trysiek bol nastriekaný nutričný roztok a baktérie Thiobacillus. V komore bola vlhkosť 98 % a teplota $30^\circ C$. Rýchlosť korózie v tejto upravenej komore sa odhadovala na 24-násobok rýchlosti pozorovaných v teréne. Konfigurácie pôvodnej hamburskej komory a komory podľa Ehricha a kol. sú znázornené na Obr. 1(a) a 1(b) [5].

Heidelbergská komora

Testovacie vzorky sú uložené v teplom ($28-30^\circ C$) a vlhkom reaktore. Baktérie Thiobacillus sú kultivované v roztoku kyseliny s pH okolo 3,5 vo fermentátore. Roztok s baktériami je čerpaný cez vzorku po dobu 5 min každú hodinu. V porovnaní s originálnou Hamburskou komorou je v tomto prípade interval potrebný na štúdium odolnosti betónových materiálov oveľa kratší (napr. 1-3 mesiace oproti 1 roku). Problémom je, že určitú dobu medzi dvomi cyklami ponárania sú baktérie prítomné na povrchu vzorky, avšak bez svojho nutričného roztoku. Navyše, nutričný roztok pôsobiaci na vzorku prispieva k povrchovým zmenám.



Obr. 1 (a) Hamburgská komora, (b) modifikovaná Hamburgská komora podľa Ehricha.

Metóda Univerzity v Ghente

Táto cyklická metóda bola vyvinutá výskumnými pracovníkmi z Ghentovej Univerzity, ktorých cieľom bolo simulovať najhoršie lokálne podmienky. Každý cyklus pozostáva zo 17 dní, pričom každý je rozdelený do 4 krokov: 1) vzorka je vystavená 250 ppm plynného sulfánu; 2) 10 dní je vzorka ponorená v roztoku baktérii Thiobacillus; 3) 2 dni je vzorka oplachovaná destilovanou vodou; 4) 2 dni je vzorka sušená. Sporné pri tejto metóde je, že testovacie podmienky nekopírujú reálne podmienky a ponorenie vzorky na 10 dní do kyselinového kultivovaného média sa môže považovať za čistý kyselinový atak, bez ohľadu na skutočnosť, že boli použité baktérie. Proces sušenia vzorky počas cyklu môže obmedziť rast mikroorganizmov a následne ovplyvniť koncentráciu kyseliny [4]. Podobne ako v prípade Heidelbergovej komory, vzťah medzi mierou korózie cyklickej simulácie a v reálnych kanalizačných podmienkach nie je známy [6].

Iné metódy

Okrem vyššie spomínaných metód, bolo vyskúšaných mnoho ďalších metód pre simuláciu MIC v laboratórnych podmienkach. Simulácia je vo všeobecnosti dosiahnutá jedným meraním alebo kombináciou meraní, napr. zvyšovaním teploty, relatívnej vlhkosti, poskytovaním nutričného roztoku pre nárast baktérii alebo poskytovaním dostatočného zdroja síry ($H_2S_{(g)}$) pre oxidáciu kyseliny sírovej. V BAC teste (Biogenic Acid Concrete) sa napr. ako zdroj síry používa tiosulfát namiesto bežne používaného plynného sulfánu. Existujú aj ďalšie simulačné komory odlišné od Hamburgskej komory rozšírené o pokročilé funkcie vrátane lepšej kontroly koncentrácie $H_2S_{(g)}$, teploty, relatívnej vlhkosti, zaznamenávania údajov, možnosti spracovania atď. Opäť treba poznamenať, že porovnanie miery korózie meranej v simulačných komorách a korózie v reálnych kanalizačných podmienkach nie sú jednoznačné. Kľúčové črty vybraných laboratórnych simulačných nastavení sú zosumarizované v Tab. 1 [4].

Tab. 1 Porovnanie kľúčových vlastností vybraných laboratórnych simulačných nastavení.

Zariadenie	Typ vzorky	Rozmer vzorky	Expozícia	C [ppm] T [°C] RH [%]	Zdroj síry	Typ baktérie	Spôsob nanášania
HaK	betón	60x11x7	čiastočne ponorenie do vody s pH 7	10±1 30 >95	H ₂ S (g)	Thiobacillus	rozprašované
Ehrich	malta	2x2x2	vodný kúpeľ	10±5 30 ~ 98	H ₂ S (g)	Thiobacillus	rozprašované
HeK	malta	6x1x1	cyklické ponáranie do kyseliny s pH 4	10 g/l 28-30 -	Elementárna síra	Thiobacillus thiooxidans	inokulované do reaktora
Uni v Ghente	malta	2x2x5	cyklické testovanie	~ 250 -	H ₂ S (g)	Thiobacillus	inokulované na povrch maltovej vzorky
	betón	ø8x1,5					
Mori	malta	4x4x16	čiastočne ponorené v odpadovej vode, voda a kultivačné médium	~ 400 13-28 -	H ₂ S (g)	Thiobacillus thiooxidans	inokulované na povrch maltovej vzorky
House	betón	20x3,8x3,8	nutričný roztok nastriekaný na vzorku	75-125 28-32 99	H ₂ S (g)	Thiobacillus	rozprašované
Jiang	betón	10x7x7	čiastočne ponorené v odpadovej vode alebo zavesené	0-200 17-30 90-100	H ₂ S (g)	nepridávané ďalšie baktérie okrem tých obsiahnutých v odpadovej vode	

Experimentálne reaktory

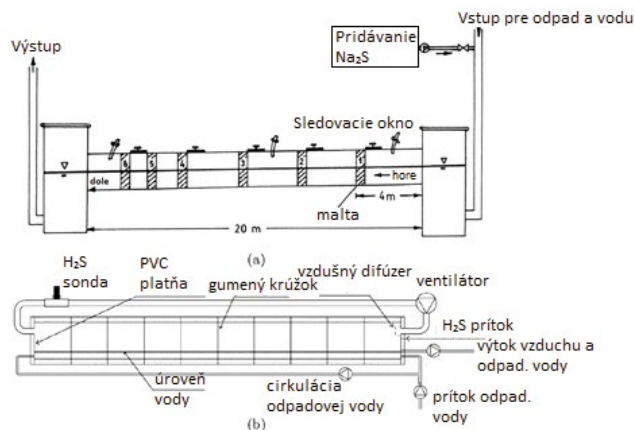
Experimentálne reaktory poskytujú možnosť študovať MIC za podmienok blízkych reálnej expozícii. Jedným z najpozoruhodnejších je Virginský experimentálny reaktor v severnej Afrike [1], pričom výsledky získané z neho tvorili základ pri vytváraní niektorých smerníc pre navrhovanie kanalizačných sietí [4]. Experimentálne kanalizačné potrubie s priemerom 15 cm a dĺžkou 20 m navrhli Mori a kol. Odpadové vody sú čerpané do potrubia, v ktorom sú vložené vzorky malty, ponorené do odpadovej vody. Teplota v potrubí sa pohybuje medzi 12–30 °C a koncentrácia plynného sulfánu je 25–300 ppm. Schéma zariadenia je znázornená na Obr. 2 (a) [7].

Vollertsen a kol. [8] a Jensen [9] vo svojich štúdiách prezentujú niekoľko experimentálnych reaktorov. Každý experimentálny reaktor pozostáva z 10 segmentov betónových rúr s vnútorným priemerom 20 cm a dĺžkou 20 cm pre každý segment, takže celková dĺžka je 2 m. Nameraná koncentrácia H₂S_(g) bola medzi 0 a 1 000 ppm a teplota bola 3–20 °C. Zariadenie je schematicky znázornené na Obr. 3(b). Podobné usporiadanie pozostávajúce z dvoch rúr s nominálnym priemerom 40 cm navrhli aj Rieck a Hüttl [10].

In-situ testy

In-situ testovanie slúži na štúdium korózie v špecifických miestnych podmienkach. Spravidla sa uskutočňujú dva typy testovania: (1) vzorky sa pripravujú a následne umiestnia na konkrétne miesto v kanalizácii, (2) vzorky betónu sa odoberú z kanalizačných štruktúr, kde došlo ku korózii, pričom sa monitorujú lokálne podmienky (teplota, koncentrácia H₂S_(g), prítomnosť mikroorganizmov, atď.).

Centrálny in-situ poskytujú cenné informácie o betónových materiáloch v konkrétnych miestnych podmienkach. Na druhej strane by sa mala starostlivo zvážiť použiteľnosť výsledkov získaných z jednotlivých miest, pretože na výsledky môže mať vplyv mnoho faktorov. Najdôležitejším aspektom môže byť v zásade kvantifikácia účinkov rôznych faktorov na korózne správanie na základe získaných výsledkov a dostupných informácií.



Obr. 2 Schematické znázornenie experimentálnych reaktorov (a): zariadenie podľa Moriho a kol.; (b): skúšobný reaktor podľa Vollertsen a kol.

Porovnanie hodnotiacich metód

Tab. 2 Sumarizácia hlavných výhod a nevýhod testovacích / hodnotiacich metód MIC betónu [4].

Metóda	Výhody	Nevýhody
Test ponorením (s kyselinou sírovou)	Zachytáva hlavnú časť poškodenia betónu pôsobením kyseliny (posledná fáza procesu MIC) Čas testovania môže byť kratší v porovnaní s biologickými testami Metóda je relatívne jednoduchá	Na výsledky môže mať vplyv množstvo faktorov, napr. stav a geometria vzorky, koncentrácia kyseliny, čo sťažuje interpretáciu výsledkov Pri rôznych testoch sa zaznamenali veľké odchýlky výsledkov
Test ponorením (s ostatnými kyselinami alebo soľným roztokom)	Môže odrážať časť poškodenia betónu pôsobením kyseliny (posledná fáza procesu MIC) Čas testovania môže byť oveľa kratší v porovnaní s biologickými testami Metóda je relatívne jednoduchá	Reprezentatívnosť metód pre MIC betónu je dosť obmedzená Celkovo je metóda otázná
Laboratórne simulačné testy (LST)	Môže do istej miery simulovať lokálne podmienky Faktory prostredia ako teplota, RH, koncentrácia H ₂ S môžu byť kontrolované, čo poskytuje možnosť skúmať účinky každého faktora zvlášť	Nie všetky aspekty sa dajú reprodukovať, (napr. vysoká miera korózie v podhl'adoch) Potrebné vybavenie je pomerne komplikované a často sa vyrába na mieru, čo znamená vysoké náklady Čas testovania môže byť dlhý
Experimentálne reaktory	Testovacie podmienky sú blízke podmienkam reálnych kanalizácií Zvyčajne, faktory prostredia ako teplota, RH, úroveň H ₂ S môžu byť kontrolované	Potrebné vybavenie je komplikovanejšie ako pri LST a nevyhnutne si vyžaduje vyššie investičné náklady Čas testovania môže byť dlhý

In-situ expozičné testy	Testy sa vykonávajú v reálnych podmienkach,	Zachytáva korózne správanie na konkrétnych miestach, pričom by sa mala pozorne analyzovať
	Potrebných zdrojov môže byť v porovnaní s laboratórnymi simulačnými testami a experimentálnymi reaktormi ešte menej	použiteľnosť výsledkov získaných z jednotlivých miest Dlhý čas získavania výsledkov

Je náročné vytvoriť jedinú komplexnú metódu pre testovanie MIC betónu. House and Wise [12] navrhujú preskúmať každé štádium korózie zvlášť a navrhujú trojstupňový model. Upozorňujú, že je potrebné klásť dôraz na štúdium uchytania a rastu baktérií na povrchu betónu a na stanovenie vzťahu medzi bakteriálnou produkciou kyseliny sírovej a koncentráciou síranov [4]. V chemickom ataku korózna vrstva vytvára bariéru pre ďalší atak, zatiaľ čo pre biogénny atak kyseliny sa táto korózna vrstva stáva výborným „úkrytom“, kde môžu mikroorganizmy/baktérie rásť a následne zrýchliť proces korózie.

Pod'akovanie

Táto práca vznikla za podpory projektu VEGA 2/0142/19.

Použité zdroje

- [1] WU, Min, Tian WANG, Kai WU a Lili KAN. Microbiologically induced corrosion of concrete in sewer structures: A review of the mechanisms and phenomena. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, 239, [cit. 2020-11-11]. ISSN 09500618.
- [2] GUTIÉRREZ-PADILLA, Ma. Guadalupe D., Angela BIELEFELDT, Serguei OVTCHINNIKOV, Mark HERNANDEZ a Joann SILVERSTEIN. Biogenic sulfuric acid attack on different types of commercially produced concrete sewer pipes. *Cement and Concrete Research* [online]. 2010, 40(2), 293-301 [cit. 2020-11-11]. ISSN 00088846.
- [3] GRENGG, Cyrill, Florian MITTERMAYER, Neven UKRAINCZYK, Günther KORAIMANN, Sabine KIENESBERGER a Martin DIETZEL. Advances in concrete materials for sewer systems affected by microbial induced concrete corrosion: A review. *Water Research* [online]. 2018, 134, 341-352 [cit. 2020-11-11]. ISSN 00431354.
- [4] WANG, Tian, Kai WU, Lili KAN a Min WU. Current understanding on microbiologically induced corrosion of concrete in sewer structures: a review of the evaluation methods and mitigation measures. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, 247, 118539-118554 [cit. 2020-11-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118539
- [5] EHRICH, Silke, Laure HELARD, Roger LETOURNEUX, Jaques WILLOCOQ a Eberhard BOCK. Biogenic and Chemical Sulfuric Acid Corrosion of Mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering* [online]. 1999, 11(4), 340-344 [cit. 2020-11-11]. ISSN 0899-1561.
- [6] SAUCIER, F., HERISSON, J.: Use of calcium aluminate cement in H₂S biogenic environment, in: *Institute of Concrete Technology, Yearbook 2015–2016*, 2015, pp. 67–80.
- [7] MORI, Tadahiro, Tsuguhiro NONAKA, Kazue TAZAKI, Minako KOGA, Yasuo HIKOSAKA a Shuji NODA. Interactions of nutrients, moisture and pH on microbial corrosion of concrete sewer pipes. *Water Research* [online]. 1992, 26(1), 29-37 [cit. 2020-11-11]. ISSN 00431354.
- [8] VOLLERTSEN, Jes, Asbjørn Haaning NIELSEN, Henriette Stokbro JENSEN, Tove WIUM-ANDERSEN a Thorkild HVITVED-JACOBSEN. Corrosion of concrete sewers—The kinetics of hydrogen sulfide oxidation. *Science of The Total Environment* [online]. 2008, 394(1), 162-170 [cit. 2020-11-11]. ISSN 00489697.
- [9] JENSEN, H.S.: Hydrogen sulfide induced concrete corrosion of sewer networks (Ph.D. thesis), Department of Biotechnology, Chemistry and Environmental Engineering, 2009.
- [10] RIECK, C., HÜTTL, R.: Concrete with increased acid resistance for pipes and manholes – testing, development and application, *Concr. Plant Int.* (2011) 138–144.
- [11] MONTENY, J, E VINCKE, A BEELDENS, N DE BELIE, L TAERWE, D VAN GEMERT a W VERSTRAETE. Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 2000, 30(4), 623-634 [cit. 2020-11-11]. ISSN 00088846.
- [12] HOUSE, Mitchell a W. Jason WEISS. Review of Microbially Induced Corrosion and Comments on Needs Related to Testing Procedures. In: *Proceedings of the 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures* [online]. Purdue University Libraries Scholarly Publishing Services, 2014, 2014-07-24, s. 94-103 [cit. 2020-11-11]. ISBN 9781626710184.

CHEMICKÁ ODOLNOST TRUBEK VYTVRZOVANÝCH NA MÍSTĚ (CIPP)

CHEMICAL RESISTANCE OF CURED-IN-PLACE-PIPES (CIPP)

Jana Majerová^{*,1}, Rostislav Drochytka

^{*}majerova.j@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Bezvýkopové metody renovace potrubí jsou často využívány i při opravách potrubí v průmyslových areálech. Důležitým parametrem je proto i chemická odolnost vzniklého kompozitu. Nejsledovanější vlastností trubek CIPP je krátkodobý modul pružnosti v ohybu. Článek je věnován sledování mechanických vlastností trubek vytvrzovaných na místě. Byla sledována změna mechanických vlastností po uložení zkušebních těles v chemicky agresivním prostředí. Pro cíle experimentu byly vybrány dvě kyseliny (chlorovodíková a octová) a hydroxid amonný. Bylo zjištěno, že k největší změně došlo vlivem působení 10% roztoku hydroxidu amonného.

Klíčová slova

Chemická odolnost, CIPP, mechanické vlastnosti, krátkodobý modul pružnosti v ohybu

Abstract

Trenchless pipeline renovation methods are often used in pipeline repairs in industrial areas. Therefore, the chemical resistance of the resulting composite is also an important parameter. The most watched property of CIPP pipes is the short-term modulus of elasticity in bending. The article is devoted to monitoring the mechanical properties of pipes hardened on site. The change of mechanical properties after placing the test specimens in a chemically aggressive environment was monitored. Two acids (hydrochloric and acetic) and ammonium hydroxide were selected for the objectives of the experiment. It was found that the largest change was due to the action of 10% ammonium hydroxide solution.

Key words

Chemical resistance, CIPP, mechanical properties, short-term flexural modulus

1 ÚVOD

Renovační metoda CIPP (Curec-In-Place-Pipe) patří do skupiny bezvýkopových metod pro renovaci potrubí. Metoda je nejčastěji používána při renovacích kanalizací a vodovodů. Je možné použít danou metodu i pro renovace produktovodů a plynovodů. Renovace bezvýkopovou metodou CIPP je ve srovnání s konvenčními výkopovými metodami rychlejší a možná i v intravilánu měst a husto osídlených oblastech. Princip metody spočívá v zavedení rukávce nasyceného pryskyřicí, do renovovaného potrubí, následně nafouknutí rukávce (vodou nebo vzduchem) a vytvrzení pryskyřičného systému (horkou vodou, párou nebo UV zářením) [1], [2].

Instalační firmy se setkávají s poptávkami na renovace potrubí s odpadními vodami v různých průmyslových areálech a provozech. Pro aplikaci metody v takovém prostředí musí použité materiály splňovat základní předpoklad, kterým je dobrá chemická odolnost. Určit přesné chemické složení odpadních vod je obtížné, ale obecně se uvádí, že odpadní vody v běžné kanalizaci odpovídají svým pH asi 0,5 mol kyselině sírové [3]. Z dosavadních poznatků a znalostí z praxi vyplývá, že nejčastěji se vyskytují poškození betonových potrubí způsobená kyselinou chlorovodíkovou, sírovou a dusičnou [4]. Z toho vyplývá, že použité materiály trubek CIPP musí odolávat zejména těmto kyselinám, ale i dalším chemikáliím různých koncentrací.

Cílem experimentu bylo sledování mechanických vlastností na vzorcích trubek CIPP uložených v různých chemických prostředích po dobu 4 týdnů. Byly srovnávány výsledky mechanických zkoušek před uložením do agresivního prostředí a po uplynutí 4 týdnů uložení. Předpokládá se, že organické kyseliny působí na zkoušené kompozity agresivněji, což by se mělo projevit ve výraznějších změnách mechanických vlastností ve srovnání působení anorganických kyselin nebo hydroxidů.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Trubky CIPP jsou kompozity složené z rukávců z tkaných nebo netkaných textilií z polymerních (polyester) nebo skelných vláken a z pryskyřičného systému. Pryskyřičný systém tvoří čistá pryskyřice (polyesterová, vinylesterová nebo epoxidová), nebo může obsahovat organická nebo anorganická plniva a další přísady (ovlivňující konzistenci, rychlost polymerace apod.). Součástí rukávce je často polypropylénový nebo polyuretanový nános. Rozhodující z hlediska životnosti a trvanlivosti trubek CIPP je materiál pryskyřičného systému a materiál nánosu, který je v přímém kontaktu s proudícím médiem. Pro běžné aplikace se používá polyesterová pryskyřice. V případech chemicky nebo tepelně namáhaného potrubí se používá vinylesterová nebo epoxidová pryskyřice [5], [6]. Materiál, z kterého je vyroben nános, záleží na výrobci a typu vystýlky.

Obecně platí, že polypropylénový nános vykazuje lepší chemickou odolnost jako polyuretanový nános.

3 METODIKA

Zkušební tělesa a uložení

Pro experiment byly zvoleny klasická zkušební tělesa pro stanovení ohybových vlastností v souladu s normou ČSN EN ISO 11296-4. To znamená, že zkušební tělesa byly obloukovité výřezy potrubí šířky 50 mm, délka těles není u všech stejná, protože je závislá na tloušťce tělesa (obecně ale cca 150 mm). Zkušební tělesa byla vyrobená pomocí simulované instalace. Vystýlka z netkané polyesterové textilie (filcu) s polypropylénovým nánosem byla nasycená pryskyřičným systémem na vinylesterové bázi a vytvrzená v kovovém potrubí pomocí horké vody.

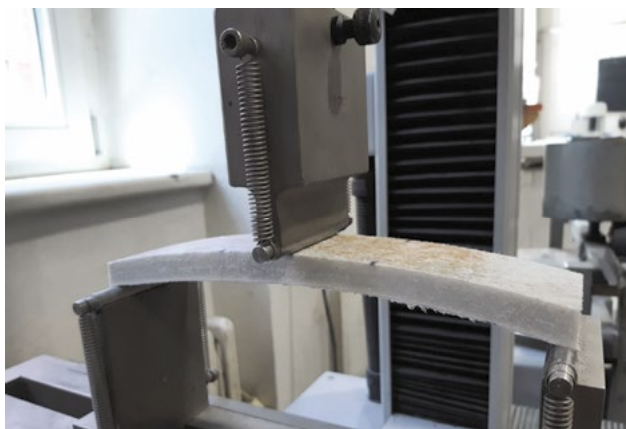
Vzorky byly uloženy v exsikátorech naplněných danou chemikálií a uzavřeny tak, aby do exsikátoru nevnikal žádný vzduch. Pro experiment byly zvoleny následující roztoky chemikálií: 15% roztok kyseliny octové (CH_3COOH), 10% roztok hydroxidu amonného (NH_4OH) a nakonec 20% roztok kyseliny chlorovodíkové.

Mechanické vlastnosti

Testování mechanických vlastností probíhalo ve zkušebním lisu Testometric M350-20CT (Obr. 1). Postup zkoušek byl shodný s postupem uváděným v příloze B normy ČSN EN ISO 11296-4. Tělesa byly po změření rozměrů vloženy do zkušebního lisu a byly zatěžovány třibodovým ohybem konstantní rychlostí 10 mm/min až do prvního porušení. Celý průběh zkoušky byl zaznamenán pomocí příslušného programu ve formě grafu. Po ukončení zkoušky byly z grafu odečteny hodnoty síly a deformace při prvním porušení. Podle postupu uvedeného v normě byly vypočteny hodnoty krátkodobého modulu pružnosti v ohybu při prvním porušení E_0 .

Pro stanovení referenčních hodnot byly vzorky před uložením do exsikátorů s chemikáliemi zatíženy na 0,5 % deformace a byly stanoveny hodnoty počátečního krátkodobého modulu pružnosti v ohybu.

Vždy po uplynutí 1 týdnu byl z každé chemikálie vyjmut 1 vzorek, na kterém byla stanovena hodnota krátkodobého modulu pružnosti v ohybu. Bylo sledováno, která z vybraných chemikálií působí na zkušební tělesa nejagresivněji a způsobí největší pokles mechanických vlastností.



Obr. 1 Zkušební těleso při zatěžování v lisu.

4 VÝSLEDKY

Výsledky jednotlivých zkoušek jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 1, Tab. 2 a Tab. 3). Pro lepší přehled jsou výsledky shrnuty v souhrnném grafu (Obr. 2).

Tab. 1 Výsledky mechanických zkoušek těles uložených v 15% roztoku kyseliny octové.

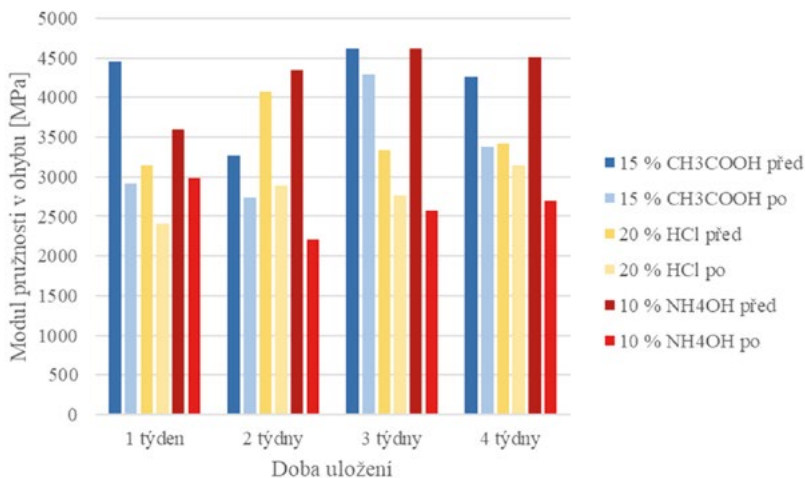
Označení vzorku	Doba uložení	Počáteční modul pružnosti [MPa] (před uložení)	Krátkodobý modul pružnosti v ohybu [MPa] (po dané době)
CH ₃ COOH - A	1 týden	4450	2920
CH ₃ COOH - B	2 týdny	3270	2730
CH ₃ COOH - C	3 týdny	4610	4290
CH ₃ COOH - D	4 týdny	4260	3380

Tab. 2 Výsledky mechanických zkoušek těles uložených v 20% roztoku kyseliny chlorovodíkové.

Označení vzorku	Doba uložení	Počáteční modul pružnosti [MPa] (před uložení)	Krátkodobý modul pružnosti v ohybu [MPa] (po dané době)
HCl - A	1 týden	3150	2410
HCl - B	2 týdny	4070	2890
HCl - C	3 týdny	3330	2760
HCl - D	4 týdny	3420	3150

Tab. 3 Výsledky mechanických zkoušek těles uložených v 10% roztoku hydroxidu amonného.

Označení vzorku	Doba uložení	Počáteční modul pružnosti [MPa] (před uložení)	Krátkodobý modul pružnosti v ohybu [MPa] (po dané době)
NH ₄ OH - A	1 týden	3600	2980
NH ₄ OH - B	2 týdny	4340	2210
NH ₄ OH - C	3 týdny	4610	2570
NH ₄ OH - D	4 týdny	4510	2700



Obr. 2 Souhrn výsledků mechanických zkoušek.

5 DISKUZE

Z uvedených výsledků vyplývá, že u všech vzorků došlo k poklesu mechanických vlastností. Pokles se projevil již po prvním týdnu uložení zkušebních těles v chemikáliích. Kromě změny mechanických vlastností neprojevovaly zkušební tělesa žádné další výrazné známky degradace materiálu. Lze říct, že působení organické a anorganické kyseliny na zkušební tělesa bylo velmi podobné. Výraznější změny jsou patrné v případě působení 10% roztoku hydroxidu amonného.

Pokles modulu pružnosti v ohybu byl pozorovatelný již po prvním týdnu. U vzorků uložených v 15% roztoku kyseliny octové byly největší rozdíly před a po uložení právě v prvním a ve čtvrtém týdnu. U vzorků uložených v 20% roztoku kyseliny chlorovodíkové to bylo v prvním a druhém týdnu. U vzorků uložených v 10% roztoku hydroxidu amonného byly největší rozdíly v mechanických vlastnostech patrné v druhém a třetím týdnu. Tady je zřejmé, že každé chemické prostředí působí na zkušební tělesa úplně jinak.

6 ZÁVĚR

Cílem experimentu bylo sledování a vyhodnocení vlivu působení vybraných roztoků chemikálií na vzorky trubek CIPP. Pozornost byla zaměřena na posouzení a srovnání mechanických vlastností, především modulu pružnosti v ohybu před a po uložení do chemicky agresivního prostředí.

U všech vzorků bylo možné pozorovat pokles hodnot krátkodobého modulu pružnosti v ohybu a to už po 1 týdnu uložení. Byl předpoklad, že nejagresivněji budou působit organické kyseliny. Tento předpoklad se nepotvrdil. Na základě výsledků experimentu lze říct, že nejvýraznější změny mechanických vlastností se projeví u vzorků uložených v roztoku 10% hydroxidu amonného.

Je potřeba podotknout, že pro experiment byly zvoleny relativně vysoké koncentrace kyselin a hydroxidu, které by se v běžném provozu neměly objevovat.

V budoucnosti by bylo zajímavé prodloužit časový interval na dobu několik měsíců a případně zvolit i jiné roztoky kyselin nebo hydroxidů (např. kyselinu sírovou). Další alternativou je doplnění experimentu další vhodnou zkouškou, prostřednictvím které by byly vidět změny ve struktuře zkušebních těles.

Poděkování

Článek vznikl v rámci projektu FAST-J-20-6424 Studium vlastností kompozitních materiálů pro bezvýkopové renovace potrubí metodou CIPP.

Použitá zdroje

- [1] ALLOUCHE, E., S. ALAM, J. SIMICEVIC, R. STERLING, W. CONDIT, J. MATTHEWS a A. SELVAKUMAR. A pilot study for retrospective evaluation of cured-in-place pipe (CIPP) rehabilitation of municipal gravity sewers. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014, 39, 82-93. ISSN 08867798. Dostupné z: doi:10.1016/j.tust.2012.02.002
- [2] BERGLUND, Daniel, Parastou KHARAZMI, Sofia MILIUTENKO, Folke BJÖRK a Tove MALMQVIST. Comparative life-cycle assessment for renovation methods of waste water sewerage systems for apartment buildings. *Journal of Building Engineering*. 2018, 19, 98-108. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobe.2018.04.019
- [3] ČSN EN ISO 11296-4. Plastové potrubní systémy pro renovace beztlakových kanalizačních přípojek a stokových sítí uložených v zemi - Část 4: Vyložkování trubkami vytvrzovanými na místě. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [4] STEIN, D., S. KENTGENS a A. BORNMANN. Feststellung und Bewertung von Schäden an Abwasserkanälen und -leitungen unter besonderer Berücksichtigung der Standsicherheit und Funktionsfähigkeit der Kanäle. Wassergefährdung durch undichte Kanäle. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999, 1999, , 143-212. ISBN 978-3-642-63640-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-58546-3_3
- [5] KOERNER, G. Geosynthetic use in trenchless pipe remediation and rehabilitation. *Geotextiles and Geomembranes*. 1996, 14(3-4), 223-237. ISSN 02661144. Dostupné z: doi:10.1016/0266-1144(96)00012-X
- [6] AOC: Trusted Solutions [online]. 2020 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: <https://www.aoc-resins.com/index.html>

SYNTÉZA ŽÁROVZDORNÉ FORSTERIT-SPINELOVÉ KERAMIKY Z RŮZNÝCH VSTUPNÍCH SUROVIN

SYNTHESIS OF REFRACTORY FORSTERITE-SPINEL CERAMICS FROM DIFFERENT RAW MATERIALS

Martin Nguyen^{*1}, Radomír Sokolář¹

^{*}nguyen.m@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, ústav technologie stavebních hmot a dílců, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

Tento článek se zabývá procesem syntézy žárovzdorné forsterit-spinelové keramiky za použití různých vstupních surovin. Vstupní suroviny byly rozemlety, smíchány v různém poměru a vypáleny při 1500 °C po dobu 2 h. Vypálené zkušební vzorky byly charakterizovány pomocí RTG difrakční analýzy a rastrovacího elektronového mikroskopu. Rovněž byla zkoumána pórovitost, nasákavost, objemová hmotnost, žárovzdornost, únosnost v žáru a odolnost proti změnám teplot. Vliv různých surovinových směsí byl zkoumán v souladu s výslednými vlastnostmi a mikrostrukturou všech vypálených vzorků. Přítomnost spinelu ve vzorcích vedla ke zlepšení mikrostruktury, mechanických vlastností a odolnosti proti změnám teplot. Zejména směsi s 10–20 % spinelu měly nejslibnější výsledky.

Klíčová slova

Forsterit, spinel, žárovzdornost, keramika

Abstract

This article examines the process for the synthesis of forsterite–spinel refractory ceramics from different raw materials. Raw materials were milled, mixed in different ratios and sintered at 1500 °C for 2 h. Sintered samples were characterized by XRD and SEM. Porosity, water absorption, bulk density, refractoriness, refractoriness under load and thermal shock resistance were also investigated. The impact of different raw material mixtures was investigated in accordance with the resulting properties and microstructure of all fired samples. Presence of spinel in fired samples led to improved microstructural and mechanical properties and thermal shock resistance. In particular, mixtures with 10–20 % of spinel had the most promising results.

Key words

Forsterite, spinel, refractoriness, ceramics

1 ÚVOD

Žárovzdorná forsteritová keramika je důležitým typem materiálu, chemický vzorec forsteritu je $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ a forsterit se využívá především v metalurgickém a cementářském průmyslu jako vyzdívka metalurgických a rotačních pecí díky vysoké teplotě tání forsteritu až 1890 °C [1], [2], [3]. Forsterit je také využíván v elektrotechnickém průmyslu pro spojení keramiky s kovem, a to díky poměrně vysokému koeficientu délkové teplotní roztažnosti, který je podobný koeficientu kovů [4], [5].

Kvůli vysokému koeficientu délkové teplotní roztažnosti má čistý forsterit poměrně malou odolnost proti náhlým změnám teplot. Tuto vlastnost lze vylepšit přidáním hořečnato-hlinitého spinelu (MA-spinel; spinel). Přidáním již malého množství (10–20 %) spinelu dochází ke zlepšení mikrostruktury, mechanických vlastností a zejména zvýšení odolnosti proti změnám teplot [6], [7]. Spinel lze syntetizovat z oxidu hlinitého a oxidu hořečnatého, jeho chemický vzorec je $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$.

Hlavním cílem tohoto příspěvku bylo stanovení vlivu různých surovinových směsí na výsledné vlastnosti forsterit-spinelové keramiky. Byly zkoumány zejména fyzikálně-mechanické vlastnosti jako jsou pórovitost, nasákavost, objemová hmotnost nebo pevnost v tahu za ohybu, fázové složení pomocí RTG difrakční analýzy, mikrostruktura pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu a žárovzdorné vlastnosti.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Doposud byly provedeny různorodé studie týkající se využití forsteritu jako krystalu v kruhových laserech [8], jako slibného biomateriálu pro transplantaci kostí v biomedicině [9], [10] nebo také jako materiálu pro kompozitní nanomateriály [11], [12]. Jak již bylo zmíněno, primární využití nachází forsterit jako vyzdívkva rotačních a metalurgických pecí díky vysoké teplotě tavení až 1890 °C a vysoké žárovzdomosti 1850 °C nebo v elektrotechnice pro spojení keramiky s kovem při výrobě různých součástek jako jsou například rezistory díky podobnému koeficientu teplotní roztažnosti, jaký mají kovy se stoupající teplotou.

Vysokoteplotní popílek, jenž je produkován jako druhotná surovina z elektráren spalujících uhlí, lze využít jako levný zdroj oxidů hlinitého a křemičitého. Využitím i minoritního množství druhotné suroviny jako vstupní je velmi přínosné pro ekologii a má také pozitivní environmentální vliv na udržitelný rozvoj v budoucnosti. Oxid křemičitý a hlinitý lze využít právě při slinování žárovzdomé keramiky. Elektrárenský popílek byl využitý v mnoha vědeckých studiích s dobrými výslednými vlastnostmi [13], [14]. Spinelová keramika se společně s magnezitem především využívá také jako vyzdívkva rotačních pecí pro výrobu cementu a vápna díky velmi vysokému bodu tání 2135 °C, nízké teplotní roztažnosti v porovnání s forsteritovou keramikou a také dobrou odolností proti náhlým změnám teplot a korozní odolností [6], [7], [11]. Navzdory využití popílku pro syntézu žárovzdomé hlinito-křemičitanové keramiky bylo provedeno jen nemnoho výzkumů zabývajících se využitím elektrárenského popílku pro syntézu jiných žárovzdomých materiálů obsahujících oxidy křemíku anebo hliníku, jako je například forsterit-spinelová keramika. To byl také podnět pro tento výzkum, jenž je zaměřen právě na málo probádanou oblast žárovzdomé keramiky s využitím popílku jako vstupní suroviny.

3 METODIKA

Vstupní suroviny byly získány z několika různých lokalit. Kalcinovaný kaustický magnezit (CCM 85) ze Slovenských magnezitových závodů v Jelšavě, olivín od norské společnosti A/S Olivin, reaktivní oxid hlinitý CTC 22 od společnosti Almatiss, Německo, vysokoteplotní popílek z elektrárny Mělník a kaolin Sedlec Ia od společnosti Sedlecký kaolin. Chemické složení vstupních surovin je zobrazeno v Tab. 1 a bylo stanoveno pomocí chemické analýzy a rentgenové fluorescence (XRF).

Tab. 1 Chemické složení vstupních surovin.

Vstupní suroviny	MgO [%]	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	K ₂ O + Na ₂ O [%]	ZŽ* [%]
CCM 85	85,0	0,5	0,8	5,2	7,30	0,20	1,0
Olivín	24,1	64,7	1,0	0,7	8,80	0,50	1,0
Reaktivní oxid hlinitý	0,0	0,0	99,7	0,0	0,03	0,12	0,1
Popílek	1,4	57,3	29,3	2,2	5,10	1,70	1,2
Kaolin Sedlec Ia	0,5	46,8	36,6	0,7	0,85	1,20	13,2

*ztráta žíháním

Celkem bylo navrženo 6 různých směsí, které byly rozděleny do dvou sad v závislosti na zdroji oxidu hlinitého pro syntézu spinelu. První sada tří různých směsí obsahovala jako zdroj oxidu hlinitého reaktivní oxid hlinitý CTC 22 (označeny ROH10–ROH30). Druhá sada tří různých směsí obsahovala jako zdroj oxidu hlinitého vysokoteplotní popílek (označeny VP10–VP30). Číslovka v názvu směsí označuje podíl popílku v množství 10 %, 20 % a 30 %. Z chemického složení bylo vypočítáno přesné množství oxidu hlinitého ve směsích s popílkem a v závislosti na něm bylo do směsí ROH přidáno poměrné množství reaktivního oxidu hlinitého, aby bylo dosaženo stejného molárního poměru. Surovinové složení všech navržených směsí je zobrazeno v Tab. 2.

Tab. 2 Surovinové složení navržených směsí.

Označení směsi	CCM 85 [hm. %]	Olivín [hm. %]	Reaktivní oxid hlinitý [hm. %]	Vysokoteplotní popílek [hm. %]	Kaolin Sedlec Ia [hm. %]
VP10	43,2	41,8	-	10,0	5,0
ROH10	41,0	51,1	2,9	-	5,0
VP20	44,1	30,9	-	20,0	5,0
ROH20	39,8	49,4	5,8	-	5,0
VP30	45,0	20,0	-	30,0	5,0
ROH30	38,6	47,8	8,6	-	5,0

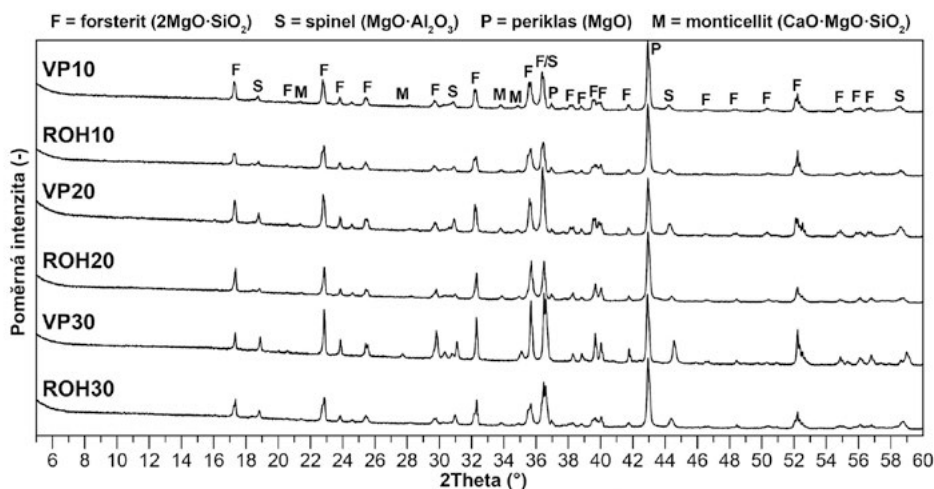
Všechny směsi byly připraveny rozemletím hrubších vstupních surovin tak, aby propadly sítem o velikosti oka 0,064 mm. Po smíchání vstupních surovin byly směsi homogenizovány v rotačním mechanickém homogenizátoru po dobu 24 hodin. Po smíchání s vodou bylo pomocí Pfefferkornova přístroje zhotoveno optimální plastické těsto a z něj byly poté formovány zkušební vzorky ve tvaru hranolu o rozměrech $20 \times 25 \times 100$ mm a ve tvaru kužele o výšce 50 mm a průměru 50 mm. Ze stejného plastického těsta také zkušební žároměrky ve tvaru jehlanu dle ČSN EN 993-13. Zkušební vzorky byly poté vysušeny v laboratorní sušárně při teplotě 105°C do konstantní hmotnosti. Po sušení následoval výpal zkušebních vzorků při teplotě 1500°C s teplotním nárůstem $4^\circ\text{C}/\text{min}$ a dobou výdrže 2 hodiny při maximální teplotě.

Vypálené zkušební vzorky byly poté podrobeny několika experimentům. Zdánlivá pórovitost, nasákavost a objemová hmotnost byly stanoveny dle ČSN EN 993-1. Délkové změny výpalem dle ČSN EN 993-10. Žárovzdornost byla provedena dle ČSN EN 993-12 na zkušebních žároměrkách, které byly umístěny do pozorovací pece s fotoaparát, jenž umožňuje pozorování v reálném čase. Únosnost v žáru dle ISO 1893 byla provedena na válcových vzorcích a byla sledována teplota při 0,5% deformaci ($T_{0,5}$). Odolnost proti změnám teplot dle ČSN EN 993-11 metoda B, jejíž výsledkem je parametr reziduální pevnost v ohybu, který je definován jako poměr pevnosti v tahu za ohybu cyklovaných vzorků k pevnosti v tahu za ohybu necyklovaných vzorků. RTG difrakční analýza pro stanovení mineralogického složení se zdrojem záření $\text{CuK}\alpha$, urychlovací napětí 45 kV a proud 40 mA. Mikrostruktura byla pozorována pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu s prvkovou sondou.

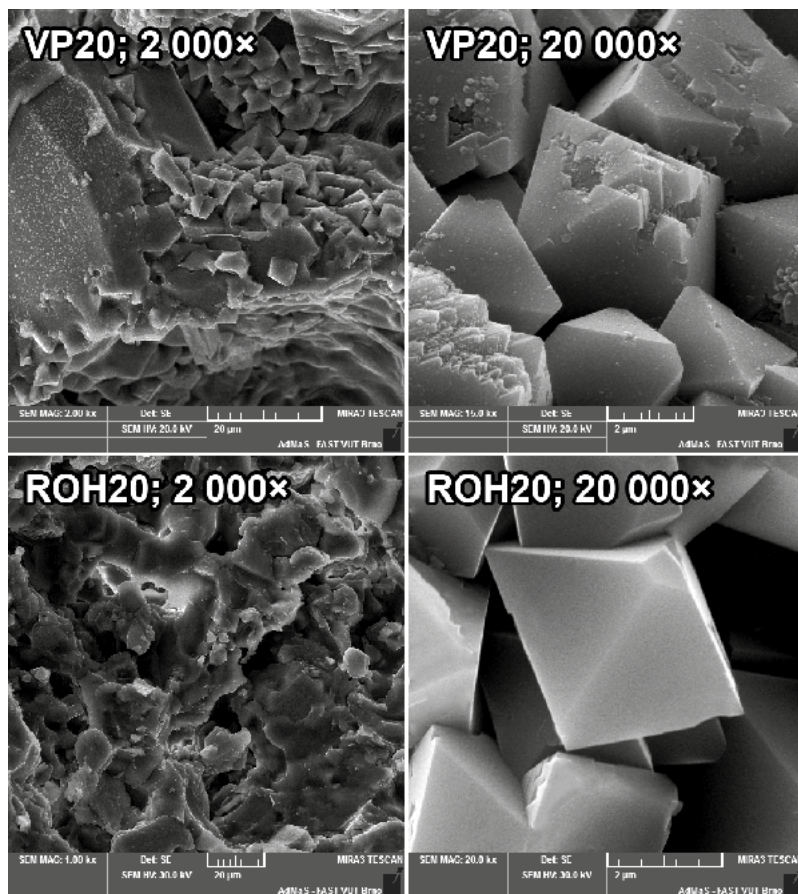
4 VÝSLEDKY

Tab. 3 Výsledky prováděných zkoušek.

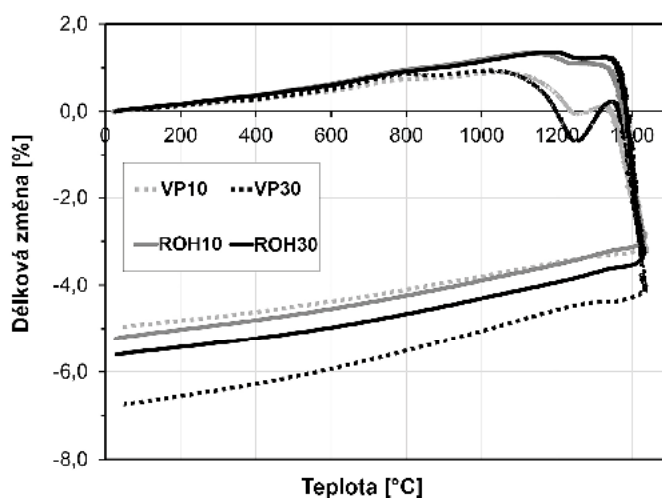
Směs	VP10	ROH10	VP20	ROH20	VP30	ROH30
Smrštění výpalem [%]	7,2	7,7	7,5	8,6	11,5	10,3
Zdánlivá pórovitost [%]	31,1	22,8	35,2	20,6	20,3	18,6
Nasákavost [%]	13,3	8,5	16,1	7,6	9,4	6,7
Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2340	2670	2190	2720	2230	2760
Žárovzdornost [$^\circ\text{C}$]	1695	1730	1670	1715	1645	1700
Únosnost v žáru $T_{0,5}$ [$^\circ\text{C}$]	1600	1645	1585	1645	1535	1660
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	13,5	12,8	17,4	19,2	19,5	20,7
Reziduální pevnost v ohybu [%]	5,9	20,3	16,7	19,8	21,9	26,9



Obr. 1 Výsledky RTG difrakční analýzy všech navržených směsí.



Obr. 2 Mikrofotografie z rastrovacího elektronového mikroskopu, směs s popílkem VP20 nahoře a směs s reaktivním oxidem hlinitým ROH 20 dole.



Obr. 3 Dilatačně-kontrakční termická analýza směsí s popílkem (tečkovaně) a reaktivním oxidem hlinitým (plně).

5 DISKUZE

Výsledky navržených zkoušek jsou prezentovány v Tab. 3. S rostoucím podílem popílku ve směsi roste také smrštení výpalem těchto směsí v důsledku vyššího množství tavicích oxidů jako jsou oxidy železa a alkálie. Na druhou stranu má však vyšší podíl tavicích oxidů pozitivní vliv na rychlost slinování a ztuhnutí struktury, což vede ke snížené pórovitosti a nasákavosti za současném zvyšování objemové hmotnosti a pevnosti. Tavicí oxidy mají však negativní vliv na žárovzdornost a únosnost v žáru. Žárovzdornost směsí s popílkem byla snížena o 4 % a únosnost v žáru $T_{0,5}$ byla snížena o 6 %. Rozdíly mezi směsí s popílkem a reaktivním oxidem hlinitým tedy nebyly příliš výrazné.

S rostoucím podílem reaktivního oxidu hlinitého ve směsi roste také pevnost v tahu za ohybu. Pevnost se zvýšila z 12,8 MPa (směs ROH10) na 20,7 MPa (směs ROH30). Podobný trend sledovala také pevnost v tahu za ohybu u směsí s popílkem (VP10–VP30). S rostoucím podílem oxidu hlinitého ve směsi tedy vzrůstá podíl krystalů spinelu ve směsi, což vede ke zlepšení a zpevnění mikrostruktury a také pevností. Toto zlepšení je dokládáno přítomností spinelových krystalů na okrajích větších shluků forsteritových krystalů, jejich vzájemnému provázání a propojení krystalů spinelu zakotvených v amorfní skelné matici, jak lze vidět na Obr. 2. Vylepšením mikrostruktury krystaly spinelu dochází také ke zlepšení odolnosti proti změnám teplot. Největší rozdíly jsou u směsí s popílkem, kdy reziduální pevnost v ohybu u směsi VP10 byla 5,9 % a ve směsi VP30 již 21,9 %.

Výsledky RTG difrakční analýzy jsou zobrazeny na Obr. 1. Všechny směsi obsahují majoritní krystalickou fázi forsterit a minoritní krystalické fáze spinel, periklas a monticellit. Rozdíly mezi množstvím přidaného popílku nebo reaktivního oxidu hlinitého jsou pouze v intenzitě peaků spinelu. Přítomnost oxidů železa je indikována šumem na pozadí, jenž je výraznější u směsí s vysokoteplotním popílkem VP10–VP30. Přítomnost amorfní skelné fáze je indikována zakřiveným pozadím při nízkých úhlech 2θ (5–25°).

Morfologie a mikrostruktura byla sledována pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu a mikrofotografie jsou vyobrazeny na Obr. 2. Krystaly spinelu vznikly ve shlucích jak ve směsích s elektrárenským popílkem, tak ve směsích s reaktivním oxidem hlinitým. Morfologicky se jednalo o rombické dipyramidy o velikosti 2–4 μm . Krystaly spinelu se nacházely na okrajích větších forsteritových zrn a také na jejich pomezí, spojující je dohromady. Krystaly spinelu, které byly syntetizovány ze směsí s reaktivním oxidem hořečnatým, byly rovnoměrnější s hladkým povrchem a bez trhlin či jiných nedokonalostí. Krystaly spinelu, které byly syntetizovány ze směsí s elektrárenským popílkem, měly trhliny s členitými a nepravidelnými hranami. Tento jev lze vysvětlit skutečností, že krystaly spinelu ze směsí s reaktivním oxidem hlinitým vznikají přímou syntézou tohoto oxidu s oxidem hořečnatým, zatímco krystaly spinelu ze směsí s popílkem vznikají nepřímo z rozkladu mullitu na oxid hlinitý a oxid křemičitý a následně pak reakcí mezi oxidem hlinitým a hořečnatým.

Dilatačně-kontrakční termická analýza směsí je prezentována na Obr. 3. Znamenné rozdíly mezi směsí s popílkem a reaktivním oxidem hlinitým byly pozorovány při teplotě nad 1000 °C. Zkušební vzorky ze směsí s popílkem měly při zkoušce čtyři rozdílné fáze. V první fázi došlo k lineární expanzi vstupních surovin, která byla pozorována až do 1000 °C, poté následovala fáze smršťování v teplotním intervalu 1000–1250 °C. Třetí pozorovaná fáze se vyznačovala expanzí v teplotním intervalu 1250–1350 °C, jenž byla způsobena růstem krystalů mullitu a jeho následným rozkladem a reakcí s oxidem hořečnatým za vzniku spinelu, což vedlo také ke tvorbě kapalně skelné fáze. Toto chování bylo také pozorováno v jiných pracích [15], [16] a předchozím výzkumu [17], [18]. Čtvrtá fáze nastala v teplotním intervalu nad 1350 °C a způsobila opětovné smršťování v důsledku působení tavicích oxidů a kapalně skelné fáze na proces slinování.

6 ZÁVĚR

Žárovzdorná forsterit-spinelová keramika byla syntetizována ze směsí s elektrárenským popílkem nebo reaktivním oxidem hlinitým pro srovnání výsledných vlastností a účinků tavicích oxidů obsažených ve vstupních surovinách a celkovému porovnání vlivu vstupních surovin na výsledné vlastnosti a mikrostrukturu. Krystaly spinelu vytvořené ze směsí s reaktivním oxidem hlinitým byly rovnoměrnější a bez prasklin či vad a výsledné vlastnosti jako je pevnost v tahu za ohybu a odolnost proti náhlým změnám teplot byly zlepšeny s rostoucím podílem oxidu hlinitého ve směsi, aniž by došlo ke zhoršení žárovzdorných vlastností.

Krystaly spinelu vytvořené ze směsí s elektrárenským popílkem byly méně rovnoměrné a měly praskliny a nerovnoměrné hrany, avšak výsledné vlastnosti (pevnost v tahu za ohybu, odolnost proti náhlým změnám teplot) byly také zlepšeny ve směsích s 10 hm. % a 20 hm. % popílku při současném mírném zhoršení žárovzdorných vlastností v jednotkách procent.

Přítomnost tavicích oxidů – oxidy železa a oxid sodný a draselný (alkálie) ve vstupních surovinách umožnily rozklad mullitu přítomného v popílkem pod jeho běžnou teplotou tavení, což umožnilo krystalizaci spinelu a vytvoření kapalně skelné fáze, která podpořila dokonalejší slinování těchto směsí.

Závěrem lze říci, že přítomnost minoritního množství spinelu ve forsteritové keramice zlepšila mikrostrukturu, pevnost v tahu za ohybu a také odolnost proti náhlým změnám teplot. Oxid hlinitý pro syntézu spinelu lze nahradit elektrárenským popílkem jako vstupní surovinou v množství 10–20 hm. % popílků za současného dosažení pozitivních výsledných vlastností při syntéze forsterit-spinelové žárovzdorné keramiky.

Poděkování

Tento příspěvek byl podpořen v rámci řešení juniorského grantu specifického výzkumu pod interní grantovou agenturou Vysokého učení technického v Brně s číslem FAST-J-20-6196 a názvem: *Vývoj žárovzdorných materiálů na bázi forsterit-spinel-magnezit s ohledem na odolnost proti korozi různými korozivními médii*.

Použité zdroje

- [1] BUDNIKOV, P. P. a kolektiv. Technologie keramiky a žárovzdorného zboží. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960, ISBN 9780262523776
- [2] KINGERY, W. Introduction to ceramics. New York: Wiley, 1960, xvi, 781 s. ISBN 04-714-7883-0.
- [3] ZHAO, Fei, Lixin ZHANG, Zhen REN, Jinxing GAO, Xiaoyu CHEN, Xinhong LIU a Tiezhu GE. A novel and green preparation of porous forsterite ceramics with excellent thermal isolation properties, *Ceramics International*, 2019, **45**(3), 2953–2961, ISSN 02728842, DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.09.296
- [4] BOUHIFD, M. A., D. ANDRAULT, G. FIQUET a P. RICHET. Thermal expansion of forsterite up to the melting point, *Geophysical research letters*, 1996, **23**(10), 1143–1146
- [5] HEILMANN, F.; Rixecker, G.; Börner, F.D.; Lippmann, W.; Hurtado, A. Fe₂O₃-doped forsterite ceramics as a joining partner for ZrO₂ in a laser brazing process. *Journal of European Ceramics Society*, 2009, **29**, 2783–2789, doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2009.03.028
- [6] MUSTAFA, E.; Khalil, N.; Gamal, A. Sintering and microstructure of spinel–forsterite bodies. *Ceramics International* 2002, **28**, 663–667, doi:10.1016/S0272-8842(02)00025-1
- [7] EWAIS, E.M.M.; El-Amir, A.A.M.; Besisa, D.H.A.; Esmat, M.; El-Anadouli, B.E.H. Synthesis of nanocrystalline MgO/MgAl₂O₄ spinel powders from industrial wastes. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017, **691**, 822–833, doi:10.1016/j.jallcom.2016.08.279
- [8] AHMAD, H.B.; McKinnie, I.T. Chromium doped forsterite ring laser. *Opt. Laser Technol.* 1995, **27**, 403–406, doi:10.1016/0030-3992(95)00031-3
- [9] KHARAZIHA, M.; Fathi, M.H. Synthesis and characterization of bioactive forsterite nanopowder. *Ceram. Int.* 2009, **35**, 2449–2454, doi:10.1016/j.ceramint.2009.02.001.
- [10] NI, S.; Chou, L.; Chang, J. Preparation and characterization of forsterite (Mg₂SiO₄) bioceramics. *Ceram. Int.* 2007, **33**, 83–88, doi:10.1016/j.ceramint.2005.07.021.
- [11] TAVANGARIAN, F.; Emadi, R. Synthesis of pure nanocrystalline magnesium silicate powder. *Ceram. Silikat*. 2010, **54**, 122–127, ISSN 1804-5847.
- [12] FATHI, M.H.; Kharaziha, M. Mechanically activated crystallization of phase pure nanocrystalline forsterite powders. *Mater. Lett.* 2008, **62**, 4306–4309, doi:10.1016/j.matlet.2008.07.015.
- [13] KUMAR, M.S.; Vanmathi, M.; Senguttuvan, G.; Mangalaraja, R.V.; Sakthivel, G. Fly Ash Constituent-Silica and Alumina Role in the Synthesis and Characterization of Cordierite Based Ceramics. *Silicon* 2018, **11**, 2599–2611, doi:10.1007/s12633-018-0049-0.
- [14] REN, Q.; Ren, Y.; Wu, X.; Bai, W.; Zheng, J.; Hai, O. Effect mechanism of spinel (MgAl₂O₄) reinforced corundum ceramics on microstructure and properties. *J. All. Com.* 2019, **793**, 146–154, doi:10.1016/j.jallcom.2019.04.151
- [15] DONG, Y.; Hampshire, S.; Zhou, J.; Ji, Z.; Wang, J.; Meng, G. Sintering and characterization of fly ash-based mullite with MgO addition. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2011, **31**, 687–695, doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2010.12.012.
- [16] CAO, J.; Dong, X.; Li, L.; Dong, Y.; Hampshire, S. Recycling of waste fly ash for production of porous mullite ceramic membrane supports with increased porosity. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2014, **34**, 3181–3194 doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2014.04.011.
- [17] NGUYEN, M.; Sokolář, R. Formation and Influence of Magnesium-Alumina Spinel on Properties of Refractory Forsterite-Spinel Ceramics. *Materiali in Tehnologije*, 2020, **54**, 135–141, doi:10.17222/mit.2019.198.
- [18] NGUYEN, Martin a Radomír SOKOLÁŘ. Impact of Fly Ash as a Raw Material on the Properties of Refractory Forsterite–Spinel Ceramics. *Minerals*. 2020, **10**(9). ISSN 2075-163X. DOI:10.3390/min10090835

VLHKOSTNÍ VLASTNOSTI SMRKOVÉHO DŘEVA

HYGROSCOPIC PROPERTIES OF SPRUCE WOOD

Petra Schütová^{*1,2}, Kamil Staněk², Jan Richter²

*Petra.Schutova@cvut.cz

¹ Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze, Třínecká 1024,273 43 Buštěhrad

² Fakulta stavební ČVUT v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6 Dejvice

Abstrakt

Ve zjednodušených inženýrských výpočtech se uvažují vlhkostní vlastnosti dřeva konstantní, v reálných podmínkách jsou však vlhkostně závislé. Tento příspěvek se zabývá dlouhodobým měřením nasákavosti při různých počátečních a okrajových podmínkách pro formulaci součinitele transportu kapalné vody ve dřevě pro pokročilé počítačové modelování. Byl navržen postup měření pro eliminování vlivu navlhavosti při měření kapilární nasákavosti částečným ponořením.

Klíčová slova

Nasákavost, navlhavost, smrkové dřevo, tepelně-vlhkostní vlastnosti, pokročilé modelování

Abstract

In simplified engineering calculations, the thermal-technical properties of wood are considered to be constant, but in real conditions they are moisture-dependent. This paper deals with the long-term measurement of absorbency at different initial and boundary conditions for the formulation of the coefficient of liquid water transport in wood for advanced computer modelling. A measurement procedure was designed to eliminate the effect of moisture transport in the measurement of water capillary uptake during partial immersion.

Key words

Water capillary uptake, spruce wood, material characteristics, advanced models

1 ÚVOD

V důsledku komplexní struktury dřeva není doposud možné získat pomocí pokročilých výpočetních modelů reálný průběh transportu kapalné vody ve dřevě.

Tato práce se zabývá dlouhodobým experimentálním měřením nasákavosti při částečném ponoření (dále absorpční test) pro smrkové dřevo ve třech směrech podle orientace vláken – radiálním, tangenciálním a axiálním (podélným). Navazuje na předchozí výzkum publikovaný ve sborníku SVK Dřevěné konstrukce a dřevostavby 2019 [1], ve kterém byly navrženy úpravy postupu měření nasákavosti vycházející z normy ČSN EN ISO 15148 [2] vzhledem ke struktuře dřeva.

Během předchozího měření ověřen vliv navlhavosti na průběh křivky nasákavosti během experimentu, tzn. že absorpční proces je kombinací příjmu kapalné vody a příjmu vzdušné vlhkosti. Tento vliv je pro další práci s naměřenými daty nežádoucí.

Cílem této práce je navrhnout set experimentů pro eliminování vlivu navlhavosti a naměření přesných parametrů pro formulaci součinitele transportu kapalné vody ve dřevě v závislosti na vlhkosti dřeva a jeho struktuře. Tento parametr je nezbytný pro pokročilé modelování dynamického tepelně-vlhkostního transportu v konstrukcích, které umožňují např. predikci vlhkosti v konstrukci s ohledem na proměnné klimatické podmínky.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

V posledních letech byl prováděn výzkum vlhkostních vlastností dřeva pomocí pokročilých nedestruktivních metod, např. rentgenové, gama a neutronové radiografie a magnetické resonance (MRI). Tyto metody umožňují sledovat rozložení vlhkosti ve vzorku v čase. Tímto způsobem prováděli grafickou analýzu absorpce vody ve dřevě např. Zillig [3] a Sedighi-Gilani [4].

Stále nejběžnějším způsobem měření nasákavosti dřeva je však ruční metoda, která je v normách popsána pro různé materiály. Pro dřevo stanovuje postup norma ČSN 49 0104 z roku 1988 [5]. Zjišťuje se zde největší množství vody, které je zkušební těleso schopné přijmout při dlouhodobém uložení ve vodě. Postup a především způsob vyhodnocení naměřených hodnot dle [5] však neumožňuje odvození součinitele přenosu kapalné vody potřebného pro výpočetní modely, nepostihuje totiž vývoj obsahu vlhkosti v čase. Způsob měření nasákavosti v závislosti na čase specifikuje norma ČSN EN ISO 15148 pro pórovité materiály [2]. Postupy dle této normy ale dostatečně nezohledňují specifické chování dřeva, jakožto ortotropního materiálu.

Zillig se ve své disertační práci [6] zabýval měřením nasákavosti a navlhavosti dřeva a modelováním celkového příjmu vody v průběhu 14 dní. Z předchozího výzkumu bylo však zjištěno, že ke kapilárnímu nasycení v případě dřeva dochází až po delší době v řádu měsíců. Postup měření v této práci vychází jednak ze zmíněné disertační práce [6], předchozího výzkumu [1], a práce Marin-Calleja [7], ve které již v roce 1996 navrhl kontinuální vážení vzorku za konstantních okrajových podmínek z podvěsu vah pro homogenní pórovité materiály.

3 METODIKA

Pro eliminování vlivu navlhavosti a zjištění správnosti naměřených dat byly navrženy 3 různé experimenty:

- Změření nasákavosti absorpčním testem plně vysušených vzorků
- Změření navlhavosti plně vysušených vzorků
- Změření nasákavosti předem nakondicionovaných vzorků při 94 % relativní vlhkosti, tj. ve stavu blízském nasycení vláken.

Pro plně vysušené vzorky bylo následně provedeno prosté odečtení samotné navlhavosti od nasákavosti změněné absorpčním testem. Výsledná křivka byla porovnána s křivkou kapilární nasákavosti předem nakondicionovaných vzorků při vysoké relativní vlhkosti. Naměřená data byla použita jako vstupní parametry do programu WUFI 6 pro simulování experimentu.

Příprava vzorků

Vzorky smrkového bělového dřeva o rozměrech 25 x 20 x 10 mm byly nejprve plně vysušeny v exikátoru s molekulovým sítem pro zjištění objemové hmotnosti v suchém stavu. Poté byly rozděleny podle orientace pro měření v radiálním, tangenciálním a axiálním směru, viz Obr. 1 vlevo. Tři vzorky v každém směru byly nakondicionovány v exikátoru při teplotě $23,0 \pm 2$ °C se solí KNO_3 , tj. při relativní vlhkosti $94,0 \pm 2$ %. Patnáct vzorků v radiálním směru bylo ponecháno v relativní vlhkosti $0,0 \pm 2$ % a při teplotě $23,0 \pm 2$ °C. Po ustálení hmotnosti při daných okrajových podmínkách byly vzorky zaizolovány na příslušných bočních stranách bitumenovou páskou. Nakondicionované vzorky byly opatřeny závěsným systémem. Vysušené vzorky byly bezkontaktně zaizolovány z vrchní strany izolační lepenkou a osm vzorků bylo speciálně upraveno pro měření navlhavosti, viz Obr. 1 uprostřed. Následně byly opět kondicionovány/sušeny až do znovu-ustálení hmotnosti minimálně na $\pm 0,1$ % hmotnosti vzorku během 24 hodin.



Obr. 1 Způsob rozdělení vzorků podle orientace (vlevo), způsob přípravení vzorků pro měření navlhavosti (uprostřed) a schéma způsobu měření navlhavosti (vpravo).

Stanovení nasákavosti a navlhavosti

Pro stanovení koeficientu transportu kapalné vody pro sání D_{ws} je potřeba naměřit absorpční koeficient A_{cap} a obsah vlhkosti zcela kapilárně nasyceného vzorku w_{cap} . Tyto parametry se nejčastěji zjišťují absorpčním testem z křivky nasákavosti.

Měření nasákavosti plně vysušených vzorků bylo provedeno absorpčním testem při teplotě a vlhkosti vzduchu v laboratoři. Tyto okrajové podmínky byly kontinuálně monitorovány. Měření nasákavosti nakondicionovaných vzorků bylo stanoveno také absorpčním testem při konstantních podmínkách $94,0 \pm 2 \% RH$ a teplotě $23 \pm 2 ^\circ C$.

Pro zajištění konstantních okrajových podmínek byl zhotoven speciální exikátor, který umožňuje vážení vzorků z podvěsu. Váhy jsou v průběhu vážení napojeny na počítač, kam jsou zaznamenávána naměřená data.

Postup měření nasákavosti plně vysušených vzorků:

Vzorky jsou po ustálení hmotnosti při sušení vloženy do nádoby s demineralizovanou vodou a je spuštěn časovač. V určených intervalech jsou vzorky vždy vyndány z vody, jejich spodní povrch je jemně otřen vlhkým hadříkem tak, aby na něm nezůstávaly kapky vody a bitumenová páska ze strany vzorku byla papírovou utěrkou otřena do sucha. Poté jsou vzorky zváženy s přesností $0,001g$ a vráceny zpět na podložku. Tento proces je proveden vždy za právě 30 s a doba, po kterou vzorky nejsou v kontaktu s vodou, je zohledněna při zpracování dat. Postup se opakuje do dosažení téměř úplného nasycení vodou v axiálním směru a ustálení hmotnosti v radiálním a tangenciálním směru.

Postup měření nasákavosti nakondicionovaných vzorků:

Vzorky jsou po ustálení hmotnosti při kondicionování vloženy do nádoby s demineralizovanou vodou ve speciálním exikátoru, viz Obr. 2 vpravo. Postup měření absorpčním testem je téměř totožný, jako v případě měření plně vysušených vzorků s tím rozdílem, že jsou vzorky po celou dobu ponechány ve speciálním exikátoru za konstantních podmínek a jsou váženy z podvěsu vah.

Postup měření navlhavosti vysušených vzorků:

Speciálně upravené vzorky jsou po ustálení hmotnosti při sušení vloženy na připravené podstavce tak, aby nebyly v kontaktu s kapalnou vodou, ale byly vystaveny nasycenému vzduchu, viz Obr. 1 vpravo. V určitých intervalech jsou vzorky váženy s přesností $0,001g$ do ustálení hmotnosti, podobně jako při absorpčním testu.



Obr. 2 Experimentální set pro měření nasákavosti a navlhavosti vysušených vzorků (vlevo) a nasákavosti nakondicionovaných vzorků ve speciálním exikátoru (vpravo).

Zpracování dat A_{cap} , w_{cap} a D_{ws}

Absorpční koeficient je vyjádřen z rovnice přímky jako tangenta nárůstu kumulovaného obsahu vody poděleného

odmocninou z času během 1. fáze křivky nasákavosti:

$$\frac{m_{wet} - m_{dry}}{A} = A_{cap} \cdot t^{\frac{1}{2}} + k_1, \quad (1)$$

kde: m_{wet} je hmotnost nasáklého vzorku na konci měření [kg]; m_{dry} je hmotnost suchého vzorku na začátku měření [kg]; A je kontaktní plocha vzorku s vodou [m²]; A_{cap} je absorpční koeficient [kg/(m²·s^{1/2})], $t^{1/2}$ je odmocnina času [s^{1/2}] a k_1 je konstantní aplikační koeficient, který vyjadřuje posunutí na ose „y“.

Obsah vlhkosti zcela kapilárně nasyceného vzorku se určuje z křivky nasákavosti nalezením průsečíku mezi 1. a 2. fází absorpčního procesu. V případě dřeva se nalezení průsečíku v této práci provedlo v radiálním směru a bylo použito i pro ostatní směry. Množství nasáklé vody vztahované na plochu vzorku v tomto průsečíku je poděleno výškou vzorku:

$$w_{cap} = \frac{(m_{wet} - m_{dry})}{A} \Big|_{cross} \cdot \frac{1}{H}, \quad [\text{kg/m}^3] \quad (2)$$

kde: w_{cap} je obsah vlhkosti zcela kapilárně nasyceného vzorku [kg/m³], H je výška vzorku [m] a cross je průsečík mezi 1. a 2. fází absorpčního procesu. [8]

Z těchto naměřených parametrů je vyjádřen součinitel transportu kapalně vody pro sání ve dřevě v závislosti na vlhkosti dřeva podle vztahu:

$$D_{ws} = 3,8 \cdot \left(\frac{A_{cap}}{w_{cap}} \right)^2 \cdot 1000 \left(\frac{w}{w_{cap} - 1} \right), \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (3)$$

kde: D_{ws} je součinitel transportu kapalně vody [m²/s] a w je obsah vlhkosti ve vzorku [kg/m³].

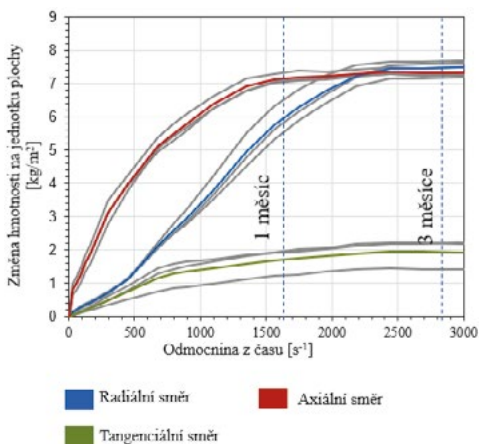
Simulace v programu WUFI 6

V programu WUFI 6 byla provedena simulace absorpčního testu kapilární nasákavosti částečným ponořením vzorků nakondicionovaných při relativní vlhkosti 94 %. Vlhkostně závislý součinitel transportu kapalně vody D_{ws} byl do programu zadán dle vzorce (3) s využitím naměřených parametrů A_{cap} a w_{cap} , viz tab. 1. Další transportní charakteristiky byly převzaty z výsledků dřívějších experimentů v laboratoři UCEEB provedených na identickém dřevě (vlhkostně závislý faktor difúzního odporu a funkce rovnovážné vlhkosti).

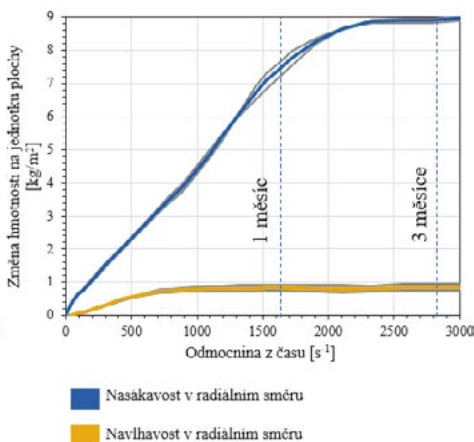
4 VÝSLEDKY

Křivky na Obr. 3 znázorňují průběh nasákavosti vzorků bělového dřeva nakondicionovaných při relativní vlhkosti 94 %. Je patrné, že v radiálním směru dosáhlo bělové dřevo stavu plného kapilárního nasycení.

Obr. 4 ukazuje průběhy samotné navlhavosti a kombinace navlhavosti s kapilární nasákavostí u bělového dřeva v radiálním směru, v obou případech z absolutně suchého stavu.



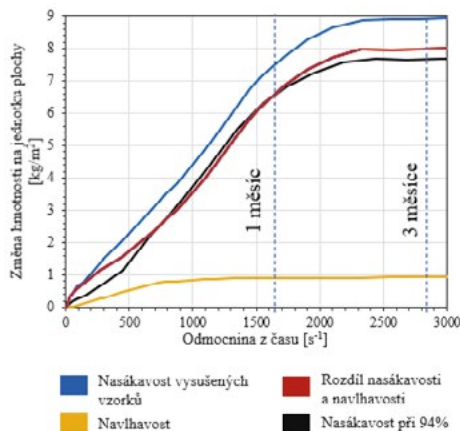
Obr. 3 Křivky nasákavosti bělového dřeva při RH 94 % předem nakondicionovaných vzorků.



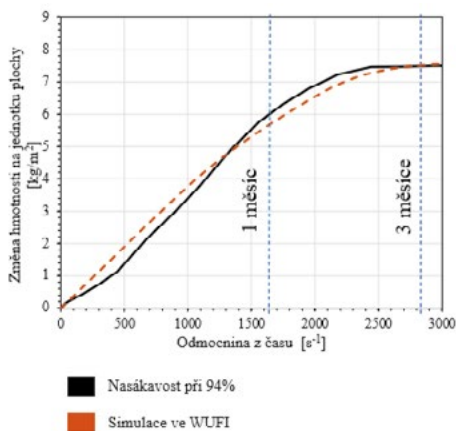
Obr. 4 Nasákavost a navlhavost bělového dřeva v radiálním směru plně vysušených vzorků.

Na Obr. 5 je průběh navlhavosti graficky odečten od křivky zahrnující navlhavost i nasákavost. Tím je získán teoretický průběh samotné kapilární nasákavosti dřeva z absolutně suchého stavu (červená křivka), který je porovnán s průběhem kapilární nasákavosti vzorků nakondicionovaných při 94 % relativní vlhkosti, tj. s minimalizovaným vlivem navlhavosti (černá křivka).

Na Obr. 6 je vyobrazeno porovnání experimentálního měření nasákavosti vzorků nakondicionovaných při relativní vlhkosti 94 % se simulací v programu WUFI 6 za stejných počátečních a okrajových podmínek.



Obr. 5 Porovnání křivky nasákavosti při RH 94 % nakondicionovaných vzorků (černá křivka) s kapilární nasákavostí bez vlivu navlhavosti plně vysušených vzorků (červená křivka).



Obr. 6 Porovnání nasákavosti nakondicionovaných vzorků bělového dřeva v radiálním směru s modelem.

V Tab.1 jsou pro bělové dřevo v radiálním směru uvedeny číselné hodnoty absorpčního koeficientu během první fáze (cca 1 týden) kapilární nasákavosti A_{cap} , a celkového obsahu vlhkosti v kapilárně zcela nasycených vzorcích, W_{tot} , který je součtem obsahu kapalné vody v lumenech, w_{cap} , a obsahu adsorbátu v buněčných stěnách, w_{cw} .

Tab. 1 w_{cap} a porovnání nasákavosti nakondicionovaných a plně vysušených vzorků a navlhavosti v první fázi pro radiální směr smrkového bělového dřeva.

Orientace vláken	$A_{cap_0\ 94\%}$ [kg/(m²·s ^{1/2})]	$A_{cap_0\ 0\%}$ [kg/(m²·s ^{1/2})]	W_{cap} [kg/m³]	W_{cw} [kg/m³]	W_{tot} [kg/m³]
Radiální	0,0031	0,0043	730,0	125,0	855,0

5 DISKUZE

Zajímavé je srovnání průběhu nasákavosti vzorků bělového dřeva v radiálním směru nakondicionovaných při relativní vlhkosti 94 % na Obr. 3 s dříve provedenými experimenty nasákavosti na plně vysušeném jádrovém dřevě [1], které v radiálním směru stavu plného kapilárního nasycení nedosáhlo. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben rozdílným chováním dřevových paprsků u jádrového a bělového dřeva. Pro ověření tohoto fenoménu probíhají další experimenty.

Na Obr. 5 je patrná dobrá shoda mezi teoretickým průběhem kapilární nasákavosti z absolutně suchého stavu bez vlivu navlhavosti (červenou křivkou) a průběhem kapilární nasákavosti nakondicionovaných vzorků při relativní vlhkosti 94 % (černou křivkou). Tato shoda je důkazem nezanedbatelného vlivu navlhavosti na hmotnostní změnu vzorků dřeva během zkoušky kapilární nasákavosti částečným ponořením suchých vzorků. Je také zřejmé, že obsah vlhkosti ve dřevě při plném kapilárním nasycení je součtem adsorbátu v buněčných stěnách a kapalné vody v lumenech.

Z průběhů křivek na Obr. 6 je patrné, že se podařilo dosáhnout poměrně dobré shody namodelované křivky a křivky vycházející z experimentálně naměřených dat. Kromě vlhkostně závislého součinitele transportu kapalné vody D_{ws} vypočítaného z experimentálně naměřených parametrů A_{cap} a w_{cap} , bylo třeba do programu zadat hodnoty experimentálně naměřeného vlhkostně závislého faktoru difúzního odporu a funkce rovnovážné vlhkosti. Při použití předem nadefinovaných materiálových charakteristik z databáze WUFI této shody nebylo možné dosáhnout.

6 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout set experimentů pro eliminování vlivu navlhavosti a naměření přesných parametrů pro formulaci součinitele transportu kapalné vody ve dřevě v závislosti na vlhkosti dřeva a jeho struktuře. Naměřené parametry byly použity jako vstupní data pro pokročilé modelování dynamického transportu vlhkosti v programu WUFI 6. Podařilo se dosáhnout poměrně dobré shody mezi namodelovanou a experimentálně naměřenou křivkou nasákavosti. Naměřené hodnoty jsou zároveň v dobré shodě s publikovanými daty [1], [6].

Byl ověřen rozdíl mezi principiálními anatomickými směry dřeva – v axiálním směru byl zaznamenán přibližně 5x větší nárůst hmotnosti než v tangenciálním směru.

Měření také ukázalo, že navlhle bělové dřevo, tj. ustálené při vysoké relativní vlhkosti, má větší kapilární příjem vody v radiální směru než ve směru tangenciálním a je v radiálním směru schopno dosáhnout plně kapilárně nasyceného stavu. Zároveň je zajímavé srovnání s dřívě provedenými experimenty nasákavosti na plně vysušeném jádrovém dřevě, které v radiálním směru stavu plného kapilárního nasycení nedosáhlo. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben rozdílným chováním dřeňových paprsků u jádrového a bělového dřeva.

Kapilární příjem vzorků nakondicionovaných při vysoké relativní vlhkosti byl ve všech anatomických směrech naměřen menší než v případě plně vysušených vzorků, což dokazuje ovlivnění absorpčního procesu navlhavosti.

Experiment také ukázal, že průběh hmotnostních přírůstků vlhkosti ve dřevě při zkoušce kapilární nasákavosti dřeva vyneseny proti odmocnině z času není lineární jako je tomu u pórovitých materiálů na silikátové bázi (např. cihelný stěp). Je proto pravděpodobné, že pro popis součinitele transportu kapalné vody D_{ws} dřeva existuje vhodnější funkční předpis, než udává rovnice (3). Zde se otevírá prostor pro další výzkum.

Tento výzkum pokračuje měřeními nasákavosti na vzorcích jádrového dřeva, které vykazují rozdílný průběh transportu kapalné vody. Cílem je zpřesnění matematického modelu transportu vlhkosti ve dřevě a aplikování modelu pro predikování chování dřeva v konstrukci vystavené obecným okrajovým podmínkám.

Poděkování

Tento výzkum byl podpořen SGS grantem č. 19/095/OHK1/2T/11 - Měření vlhkostních vlastností stavebních materiálů.

Použité zdroje

- [1] PROKOPOVÁ, Lenka. DŘEVĚNÉ KONSTRUKCE A DŘEVOSTAVBY SE ZVLÁŠTNÍM ZAMĚŘENÍM NA OBČANSKOU VÝSTAVBU: Petra Schütová: Nasákavost smrkového dřeva. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta architektury, 2019. ISBN 978-80-01-06647-8.
- [2] ČSN EN ISO 15148: *Tepleně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení nasákavosti částečným ponořením*. 1. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2004.
- [3] ZILLIG, Wolfgang. Liquid water transport in wood: Towards a mesoscopic approach. In: *Research in Building Physics and Building Engineering*. London: Taylor&Francis Group, 2015, s. 107-114. ISBN 0-415-41675-2.
- [4] SEDIGHI-GILANI, Marjan. Liquid uptake in Scots pine sapwood and hardwood visualized and quantified by neutron radiography. *Materials and Structures*. 2014, **47**(6), 1083-1096. DOI: 10.1617/s11527-013-0112-7. ISSN 1359-5997. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-013-0112-7>
- [5] ČSN 49 0104 *Skúšky vlastností rasteného dreva: Metóda zisťovania nasiakavosti a navlhavosti*. 1. Praha: ÚNM, 1988.
- [6] ZILLIG, Wolfgang. *Moisture transport in wood using a multiscale approach*. Leuven, 2009. Doctoral dissertation. Katholieke Universiteit Leuven.
- [7] MARTÍN-CALLEJA, J. New method for performing capillary absorption test. *American Ceramic Society Bulletin*. 1996, (75), 66-70.
- [8] FENG, Chi a Hans JANSSEN. Hygric properties of porous building materials (III): Impact factors and data processing methods of the capillary absorption test. *Building and Environment*. 2018, (134), 21-34.

SKÚMANIE TEPELNOIZOLAČNÝCH MATERIÁLOV PRI ZMENE RELATÍVNEJ VLHKOSTI POČAS EXPERIMENTÁLNEJ SIMULÁCII V KLIMATICKEJ KOMORE

INVESTIGATION OF THE THERMAL INSULATION MATERIALS WHEN CHANGING RELATIVE HUMIDITY DURING EXPERIMENTAL SIMULATION IN A CLIMATE CHAMBER

Katarína E. Hellová*¹, Terézia Cabanová*²

*katarina.hellova@stuba.sk, terezia.cabanova@gmail.com

¹Stavebná fakulta SvF STU, Katedra materiálového inžinierstva, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

²Stavebná fakulta SvF STU, Katedra fyziky, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Abstrakt

Táto publikácia je zameraná na tepelno-technické a hygroskopické charakteristiky tepelnoizolačných materiálov. Sledovaný bol organický materiál na báze konopných vlákien, ktorý má vysokú schopnosť absorbovať vzdušnú vlhkosť. Počas experimentálneho merania bolo možné overiť deklarované hodnoty výrobcami a sledovať zmeny materiálu počas prebiehajúcej sorpcie a následnej desorpcie v klimatickej komore. Sledovaným parametrom bola zmena súčiniteľa tepelnej vodivosti, zmena rovnovážnej vlhkosti. Tieto vlastnosti sa monitorovali počas zmeny relatívnej vlhkosti prebiehajúcej postupne z 20 % na 95 % a naspäť. Meraniami môžeme tiež vyhodnotiť vhodnosť zabudovania do stavebnej konštrukcie.

Kľúčové slová

Sorpcia, desorpcia, konope, tepelná izolácia, relatívna vlhkosť, súčiniteľ tepelnej vodivosti

Abstract

This publication is focused on thermal-technical and hygroscopic characteristics of thermal insulation materials. An organic material based on hemp fibers, which has a high ability to absorb atmospheric moisture, was monitored. During the experimental measurement, it was possible to verify the declared values by the manufacturers and monitor the changes in the material during the ongoing sorption and subsequent desorption in the climatic chamber. The monitored parameter was a change in the coefficient of thermal conductivity, a change in equilibrium humidity. These properties were monitored during the change in relative humidity occurring gradually from 20% to 95% and back. By measurements we can also evaluate the suitability of incorporation into the building structure.

Key words

Sorption, desorption, mineral wool, hemp, thermal insulation, relative humidity, thermal conductivity

1 ÚVOD

V praxi sú najčastejšie používané tepelnoizolačné materiály ako minerálna vlna či polystyrén. Tento výber materiálov je logický, nakoľko ich vlastnosti a správanie sú rokmi overené [1]. Napriek tomu sú na trhu materiály, ktoré majú porovnateľné alebo ešte lepšie izolačné vlastnosti a sú ekologické [2]. Príkladom sú konopné vlákna, ktoré sú odpadovým materiálom alebo vedľajšími produktmi poľnohospodárstva či farmakológie, ale na izoláciu sa používajú veľmi zriedka. Tento príspevok bude teda zameraný na tieto vlákňité materiály a sledovanie tepelno-technických a hygroskopických vlastností pri zmene vlhkosti.

2 POPIS SÚČASNÉHO STAVU

Vlhkosť je veľkou témou a hlavne nežiadúcim faktorom pre stavebnú činnosť, ktorý môže významne ovplyvniť vlastnosti stavebných výrobkov a konštrukcií a môže ich dokonca poškodiť [3]. Všadeprítomná vlhkosť môže byť daným produktom alebo štruktúrou absorbovaná z jeho okolia. Materiály obsahujú vodu v normálnom množstve, čo je rovnovážny obsah vlhkosti v materiáli pri teplote 23 °C a relatívnej vlhkosti 50%. Pri kondenzácii vo vnútri materiálu vzniká kvapalná voda [4]. K takejto absorpcii dochádza hlavne difúziou vodnej pary, ale aj jej kapilárnosťou a vodivosťou [2, 3]. Tieto javy sa vyskytujú už pri výrobe produktu a následne pokračujú tiež počas skladovania a prepravy, ako aj počas zabudovania produktu do stavebných konštrukcií. To, koľko vody materiály absorbujú, závisí od viacerých faktorov, najmä od teploty, tlaku a štruktúry pórov v materiáli [2, 3, 5, 6]. Izolačné materiály sú zvyčajne pórovité alebo vláknité, a preto aj z tohto dôvodu môže prítomnosť vody spôsobovať problémy vo vnútri izolačného materiálu a následne v celej konštrukcii budovy [4].

Surovinou, ktorá môže byť použitá na výrobu tepelných izolácií môžu byť aj lyková vlákna, napríklad z ľanu alebo konope. V súčasnosti sa zvyšuje záujem o ekológiu, obnoviteľné zdroje a výrobky sa čoraz viac vyberajú na základe ich kvalitatívnych výhod vrátane ich pôsobenia na životné prostredie [11]. Použitie prírodných vlákien v izolácii úzko súvisí s ekologickým stavebným sektorom [12]. Okrem toho majú tieto izolácie vyššiu výmenu vlhkosti ako anorganické materiály, a preto sa pre staré drevostavby odporúčajú iba vláknité materiály [13, 14]. Konopné vlákna sa tradične používajú vo výplňových izoláciách medzi trámami, ale v priebehu posledného desaťročia vzniklo na trhu niekoľko typov výrobkov konopných izolácií. Napriek svojmu historickému pozadiu sa tieto izolácie často považujú za nové materiály v oblasti izolácií.

Izolácie z lykových vlákien v súčasnosti tvoria iba veľmi malú časť trhu s izoláciami v celej Európe (napr. V Nemecku je to <0,5%) [15]. Jedným z dôvodov relatívne nízkeho využitia je približne dvojnásobne vyššia cena vláknitých izolácií v porovnaní napríklad s cenou minerálnej vlny. Na druhej strane, plusmi týchto izolácií sú ich ekologické vlastnosti, napr. nízka potreba energie pri výrobe, možnosť recyklácie a pozitívny vplyv na vnútorné ovzdušie [15]. Hlavnou nevýhodou použitia lykových vlákien v izoláciách je riziko vzniku plesní a teda ich kvalita by sa mala pravidelne monitorovať. Pri zbere, spracovaní, výrobe, výstavbe a údržbe budov sú potrebné dôsledné postupy, aby sa zabránilo riziku negatívnych účinkov vlhkosti na kvalitu vzduchu v interiéroch. Príkladom príspevku, ktorý pojednáva tematiku vláknitých izolácií a ich tepelnotechnických vlastností je publikácia od Kymäläinen a Sjöberg, ktorí zhodnotili vhodnosť použitia lykových vlákien ľanu a konope pre tepelné izolácie, tiež aj funkcie a požiadavky na lýtkové vláknité izolácie a o ich tepelný odpor. Ďalej hodnotia tepelnú vodivosť. Diskutuje sa tiež o potenciáli a nákladoch na surovinu a o kvalitatívnych a ekologických aspektoch [2].

3 METODIKA

Merania prebiehali v laboratórnych podmienkach s použitím dynamickej klimatickej komory Binder, model 240, ktorá sa používa na simuláciu rýchlych zmien teploty s reguláciou vlhkosti. Pomocou komory bolo následné vytvorené prostredie so stálou relatívnou vlhkosťou.

Relatívna vlhkosť vzduchu sa v komore postupne menila. Počiatočná vlhkosť bola 20 % následne sa menila na 50 %, 80 % a 95 %, počas desorpcie zase vzostupne od 95 % až nakoniec 20 %. Na experiment sa použila jedna vzorka z materiálu; vlastnosti konopnej dosky sú uvedené v kapitole 3. Vzorka bola uložená v klimatickej komore, kým sa nedosiahla rovnovážna vlhkosť vzoriek, t.j. kým sa hmotnosť skúšobných vzoriek počas opätovného váženia už nezmenila. Ustálenie vzoriek trvalo približne 40 dní pre jednu relatívnu vlhkosť.

Vzorky boli vážené na laboratórnych váhach SBS-LW-2000A. Po dosiahnutí rovnovážnej vlhkosti vzoriek sa meral koeficient tepelnej vodivosti λ v ustálenom stave prístrojom ISOMET 2114 (viď. obr. 2). Princíp merania je vo vysielaní impulzov tepelného toku do izolačného materiálu. Táto dynamická metóda umožňuje rapídne skrátiť čas merania v porovnaní s inými metódami merania. Teplotný rozsah prístroja s povrchovou sondou je od -15 °C do 50 °C v rozmedzí 0,04 až 6,0 W/(m.K). Presnosť merania (pri 20 °C) je 5 % z nameranej hodnoty, keď je $\lambda = 0,015$ až 0,70 W/(m.K). Keď je $\lambda = 0,70$ až 6,0 W/(m.K), vtedy je presnosť merania 10 % z nameraných dát.

Počas doby merania bola vzorka mimo klimatickej komory, ale skladovala sa v plastovej nádobe na zabezpečenie konštantnej vlhkosti.



Obr. 1 Klimatická komora [9].



Obr. 2 ISOMET 2114 [8].

Izolačná doska z konope

Prírodný stavebný materiál z technického konope, ktorý bol v minulosti používaný oveľa častejšie. Je vyrábaný vo flexibilnej ale aj tuhej forme. Výhodami takejto izolačnej dosky sú schopnosť akumulácie vlhkosti a tepla; izolačná schopnosť; tepelná schopnosť, vysoká difúzna schopnosť, ekologický materiál, nízka spotreba energie pri výrobe, obnoviteľná surovina, nízka objemová hmotnosť, vhodnosť pre alergikov a hmyzodpudivosť. Medzi hlavné nevýhody naopak patrí dostupnosť, cena, v prípade chemického ošetrovania rastliny je materiál nevhodný z enviromentálneho hľadiska a nízka požiarne odolnosť [7]. Použitie izolačnej dosky je hlavne pri izolácii podkrovia, stropov, strechy a izolácia stien (vnútorné aj vonkajšie).



Obr. 3 Konopná izolácia.

Tab. 1 Vlastnosti konopnej izolácie [7].

Vlastnosti:	
Hrúbka	100 mm
Objemová hmotnosť	$\rho = 100 \text{ kg/m}^3$
Súčiniteľ tepelnej vodivosti	$\lambda = 0,042 \text{ W/(m.K)}$
Faktor difúzneho odporu	$\mu = 3,9$

Stanovenia rovnovážnej vlhkosti

Vzorec na výpočet rovnovážnej vlhkosti:

$$w = \frac{m_v - m_s}{m_s} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

kde w je hmotnostná vlhkosť materiálu [%], m_v je hmotnosť vzorky ovplyvnenej vlhkosťou [g] a m_s je hmotnosť suchej vzorky [g].

Stanovenie súčiniteľa tepelnej vodivosti

Vzorec na výpočet relatívnej zmeny tepelnej vodivosti:

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda_v - \lambda_s}{\lambda_s} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

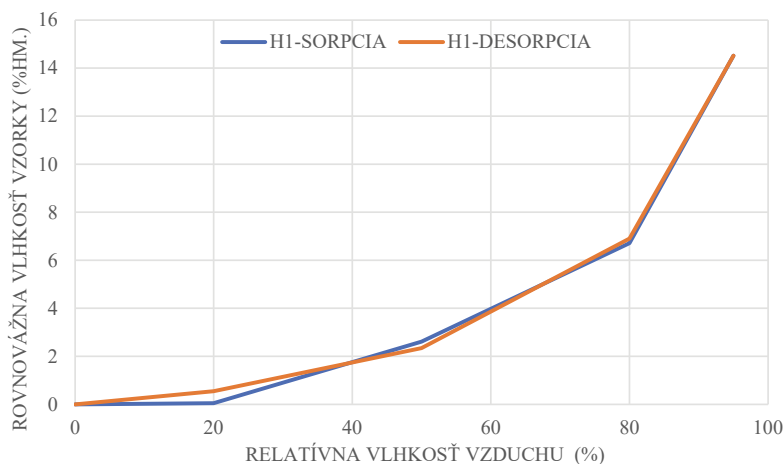
kde $\Delta \lambda$ je zmena tepelnej vodivosti [%], λ_v je súčiniteľ tepelnej vodivosti nasiaknutej vzorky [W/(m. K)] a λ_s je súčiniteľ tepelnej vodivosti suchej vzorky [W/(m. K)].

4 VÝSLEDKY

Výsledky merania rovnovážnej vlhkosti

Tab. 2 Výsledky meraní rovnovážnej vlhkosti.

VZORKA	Prebiehajúci proces	Rovnovážna vlhkosť pri rôznej relatívnej vlhkosti vzduchu [% hm.]			
		20%	50%	80%	95%
H1 (konopná izolácia)	Sorpcia	0,05	2,61	6,71	14,52
	Desorpcia	0,55	2,34	6,9	14,52



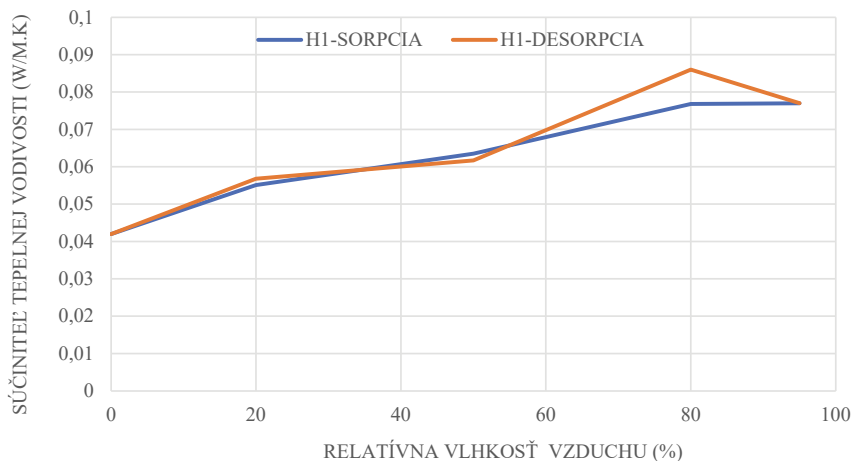
Obr. 4 Závislosť rovnovážnej vlhkosti vzorky H1 pri rôznej relatívnej vlhkosti vzduchu.

Medzi vysoko hygroskopické materiály patrí izolant na báze konope, presný názov produktu je HEMP 90. V tomto prípade nárast rovnovážnej vlhkosti bol 14,52 % (pri 95% relatívnej vlhkosti vzduchu). Žiadna zmena tvaru ani vznik plesní nebol spozorovaný.

Výsledky merania súčiniteľa tepelnej vodivosti

Tab. 3 Výsledky meraní súčiniteľa tepelnej vodivosti.

VZORKA	Prebiehajúci proces	Počiatočný súčiniteľ tepelnej vodivosti [W/(mK)]	Súčiniteľ tepelnej vodivosti pri rôznej relatívnej vlhkosti vzduchu [W/(mK)]			
			20%	50%	80%	95%
H1 (konopná izolácia)	Sorpcia	0,042	0,0551	0,0635	0,0768	0,077
	Desorpcia		0,0568	0,0617	0,086	0,077



Obr. 5 Závislosť súčiniteľa tepelnej vodivosti vzorky H1 pri rôznej relatívnej vlhkosti vzduchu.

Hodnota súčiniteľa tepelnej vodivosti, vzorky konopnej izolácie, na začiatku experimentu bola 0,042 W/(m. K). Pri 95% relatívnej vlhkosti vzduchu sa hodnoty súčiniteľa tepelnej vodivosti zvýšili na 0,077 W/(m. K).

5 DISKUSIA

Nárastom relatívnej vlhkosti vzduchu, narastá aj rovnovážna vlhkosť materiálov, čo dokazuje aj experiment. Organický materiál, tepelná izolácia na báze konopných vlákien, dosiahol nárast rovnovážnej vlhkosti o 14,52 % (pri 95% relatívnej vlhkosti vzduchu). Tento nárast vo veľkej miere znížil kvalitu tepelnoizolačného materiálu. Vplyvom zvýšenej rovnovážnej vlhkosti materiálu sa zvyšovala aj hodnota súčiniteľa tepelnej vodivosti (zhoršenie tepelno-technických vlastností materiálov). Podobne ako pri skúmaní rovnovážnej vlhkosti, organický materiál je viac náchylný na zmeny a potenciálny vznik nežiadúcich organizmov. Hodnota súčiniteľa tepelnej vodivosti, deklarované výrobcom, je pri konopnej izolácii 0,042 W/(m. K). Pri 95% relatívnej vlhkosti vzduchu sa táto hodnota približovala k 0,08 W/(m. K) a pri desorpcii už bola táto hodnota značne presiahnutá.

6 ZÁVER

Počas experimentu boli preverené vlastnosti tejto izolácii aj pri výrazne vyššej relatívnej vlhkosti. Predchádzajci výskum a ostatné zdroje uvádzajú, že lykové vlákna, ako prírodný zdroj, majú väčšie riziko pre vznik mikroorganizmov alebo inej kontaminácie a ich kvalita by sa mala pravidelne monitorovať. Tiež uvádzajú potrebu ďalší výskum a zváženie použitia prísad aby bolo zamedzené pôsobenie negatívnych účinkov na kvalitu vzduchu v interiéri. V našom prípade ale skúmaná vzorka neprejavila žiadne viditeľné kontaminácie.

Použitie lykových vlákien z konope je vhodné na izolácie hlavne kvôli svojim tepelnotechnickým vlastnostiam a aj ekológii. Experiment tiež preukázal, že vplyvom zvýšenia relatívnej vlhkosti vzduchu a teda aj rovnovážnej vlhkosti vzorky sa síce teplotné parametre úmerne zhoršujú, ale následne, pri postupnom znižovaní pôsobenia vlhkosti sa parametre vracajú do takmer pôvodných hodnôt.

Použitie zdroje

- [1] PARLATO, M. a S.M.C. PORTO. Organized Framework of Main Possible Applications of Sheep Wool Fibers in Building Components. Sustainability. 2020, 12. 761. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/3/761/pdf>
- [2] KYMÄLÄINEN, H. a A. SJÖBERG. (2008) Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. Building and Environment. 2008, vol. 43, pp. 1261-1269. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006>
- [3] MRLÍK, F. Vlhkostné problémy stavebných materiálov a konštrukcií (Moisture problems of building materials and structures). Alfa, 269 pp. Bratislava, 1985, Slovakia.
- [4] LAKATOS, Á. Investigation of the thermal insulation performance of fibrous aerogel samples under various hygrothermal environment: Laboratory tests completed with calculations and theory. Energy and Buildings. 2020, 214, 1 May 2020, 109902. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109902>
- [5] STAPULINONIENÉ, R., S. VAITKUS, S. VÉJELIS, A. SANKAUSKAITÉ. Investigation of thermal conductivity of natural fibres processed by different mechanical methods. Int. J. Precis. Eng. Manuf. 2016, 17. 1371–1381. <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0163-0>
- [6] NYKTER, M. Microbial quality of hemp (*Cannabis sativa* L.) and flax (*Linum usitatissimum* L.) from plants to thermal insulation. University of Helsinki, Helsinki. 2006. Dostupné z: <https://prirodneizolacie.sk/konopne-izolacie> (online 11.10.2020)
- [7] ZÁLESKÁ, M., Z. PAVLÍK, D. ČÍTEK, O. JANKOVSKÝ, M. PAVLÍKOVÁ. Eco-friendly concrete with scrap-tyre-rubber-based aggregate – Properties and thermal stability, Construction and Building Materials. 2019, 225, Pages 709-722, ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.168>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819318409>
- [8] <https://www.fishersci.fi/shop/products/model-mk-240-dynamic-climate-chamber-1/15632136> (online 11.10.2020)
- [9] Zákon č. 555/2005 Z. z. Zákon o energetickej hospodárnosti budov a o zmene a doplnení niektorých zákonov
- [10] STN 730540 Teplotno-technické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Tepelná ochrana budov.
- [11] Lorch R. Construction materials and the environment. The Economist Intelligence Unit, special report no. 2039. London/New York; 1990.
- [12] Murphy DPL, Behring H, Wieland H. The use of flax and hemp materials for insulating. In: Proceedings of flax and other bast plants symposium, Poznan, Poland, 30 September–1 October 1997. p. 79–84.
- [13] RIL (Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y.). Lämmön- ja kosteudeneristys. Helsinki/Jyväskylä: RIL Publication 155; 1984 [in Finnish].
- [14] Museovirasto. Lämmöneristysten parantaminen. Museovirasto & Ympäristöministeriö, Korjauskortisto KK2, 1.1.2000. Finland; 2000 [in Finnish].
- [15] Nova-Institut, Das kleine Hanf-Lexikon, Verlag Die Werkstatt, Göttingen, Germany (2003)

VÝZKUM CHEMICKY ODOLNÉHO MATERIÁLU PRO RUBOVOU INJEKTÁŽ

THE RESEARCH OF CHEMICALLY RESISTANT MATERIAL FOR THE INVERT INJECTION

Petr Figala^{*,1}

*figala.p@fce.vutbr.cz

¹ Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Tento článek se zabývá výzkumem a vývojem nové injektážní malty se zvýšenou chemickou odolností na bázi portlandského cementu. Cílem této práce je ověřit nové recepty se specifickými přísadami. Sledována byla odolnost vůči útoku vnějšími síranů, přičemž zkušební tělesa byla dle normy DIN19753 uložena do roztoku síranů 29,8 g / l (44 g / l Na₂SO₄). Z výsledků práce vyplývá, že příměsí optimálního množství krystalizační přísady je možné dosáhnout výrazného zvýšení odolnosti proti síranové korozi. Na základě získaných výsledků budou navrženy nové receptury optimalizované přidávkem vhodných druhotných surovin.

Klíčová slova

Reverzní injektáž, síranová odolnost, krystalizační přísada, modifikace

Abstract

This work deals with research and development of a new grouting mortar with increased chemical resistance based on portland cement. The aim of this work is to verify new mixtures with specific admixtures. Resistance to attack by external sulphates was monitored, while the test specimens were placed in a sulphate solution of 29.8 g / l (44 g / l Na₂SO₄) according to DIN19753. The results of the work show that the addition of the optimal amount of crystalline waterproofing admixture can achieve a significant increase in resistance to sulfate corrosion. Based on the obtained results, new mixtures will be proposed, optimized by the addition of suitable secondary raw materials.

Key words

Invert grouting, sulphate resistance, crystalline admixture, modification

1 ÚVOD

V ČR se vyskytují v největší míře stoky zděné, betonové či železobetonové. Dle statistik z roku 2018 byla celková délka Pražských zděných stok z ostře pálených cihel 546 km. Naopak v Brně je většina kanalizační sítě tvořena betonem, v celkové délce 673 km představují 60 % z celkové délky tamní kanalizační sítě [1], [2], [3].

Kanalizační síť je charakteristické expoziční prostředí s vysokými požadavky na odolnost použitých stavebních materiálů. Při sanaci kanalizací je cílem obnovit či prodloužit původní životnost celého stavebního díla. Během navrhování sanačních prací je třeba neopomenout vhodné zajištění vnější části předmětných stok nebo šachet. Odolnost horninového masivu v okolí kanalizace má zásadní vliv na životnost stavebního díla, a proto musí být dostatečně odolný vůči fyzikálně-mechanickým ale i chemickým vlivům, které na něj působí [4], [5].

Výsledky prezentované v rámci této práce se zaměřují na návrh a studium vybraných charakteristik základních surovinových variant malty na cementové bázi pro rubovou injektáž. Tento vývoj je součástí spolupráce Stavební fakulty VUT v Brně a renomovaného výrobce stavebních hmot. Cílem projektu je modifikování stávající malty tak, aby splňovala požadavky na výplňové injektážní systémy dle normy DIN 19753 [6], hlavně síranovou odolnost. Zároveň budou popsány další vybrané fyzikálně-mechanické vyvíjených surovinových variant injektážní malty.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Při budování nových kanalizací se obvykle hydroizolační systém zhotovuje stěrkováním, nástřikem či nátěrem. Dostatečné hutnosti okolní půdy je možné dosáhnout například hutněním, částečnou výměnou okolní půdy či injektováním. V případě sanace stávající kanalizace však většina z těchto technických řešení nemusí být z technologického či ekonomického pohledu proveditelná. V případech, kdy není vnější stěna konstrukce přístupná, se zpevnění či utěsnění hornin v okolí kanalizace dosahuje injektováním. Tímto způsobem se zároveň vytváří hydroizolační vrstva sanované konstrukce. Pod pojmem injektování se chápá vhnání takových tekutých směsí do horninového podloží, které v čase tuhne a tvrdne [7].

Injektování

Injektážní směsí je možné rozdělit dle způsobu ukládání do horniny na dvě kategorie, a to na injektáž kdy v hornině dochází či nedochází k přetvoření. Injektáž, při níž nedochází k přetvoření v hornině se dále dělí na průnikovou, kontaktní či výplňovou. Při těchto technologiích injektáže jsou injekční směsí zaplňovány všechny pukliny, trhliny a póry v horninovém masivu bez porušení integrity skeletu horniny. Dochází tak k omezení propustnosti injektovaného prostředí, sekundárně může dojít k stabilizaci a zvýšení pevnosti injektovaného prostředí. U výplňové injektáže dochází k zaplňování velkých dutin, je tedy kladen větší důraz na objemové změny injektážní směsí a vývin hydratačního tepla. V případě injektážních technologií způsobujících přetvoření v hornině se jedná tlakové injektáže s cílem záměrně měnit objemové parametry injektovaného prostoru. K této metodě injektování se přistupuje z důvodu zvětšení hustoty plasticky deformabilních materiálů nebo z důvodu zvětšení objemu injektované horniny. Termín tlaková injektáž zahrnuje metody jako zhuňovací injektáž či klakáz [8], [9].

Agresivita prostředí

Na horninový masiv v okolí kanalizací působí celá řada agresivních činitelů, které mohou mít nezanedbatelně negativní vliv na životnost samotné stavební konstrukce. V určitých případech mohou na konstrukce kanalizací i okolní půdu negativně působit různé zdroje dynamického zatížení. Příkladem jsou otřesy od tramvají nebo kol automobilů. Dlouhodobé vystavení nadměrnému dynamickému zatížení může vést k narušení struktury cementového kamene či podloží, v krajních případech až k sedání stavební konstrukce. Jak bylo řečeno výše, injektáží okolní půdy se vytváří hydroizolační vrstva bránící průsakům, ať již balastních vod vně kanalizací, tak průsakům v opačném směru. Existuje celá řada způsobů, kterými může voda negativně působit na stavební dílo nebo na horninové prostředí, které je se stavebním dílem úzce spjata. V první řadě může voda působit silou, tedy hydrostatickým tlakem, pórovým tlakem, či tlakem ledu. Negativně se projevuje i změna vlhkosti horninového prostředí, se kterou se mění její vlastnosti. S vzrůstajícím stupněm nasycení vodou klesá pevnost hornin, u zemín vzrůstá plasticita a klesá smyková pevnost. Nezanedbatelný vliv má voda jako transportní médium pro roznos kontaminátů či agresivních látek, které mají negativní vliv na životnost stavební konstrukce [9]. Degradaci nejčastěji způsobují sírany, chloridy, případně oxidy síry a uhlíku. Sírany a chloridové ionty se přirozeně vyskytují v zeminách. V tekoucích podzemních vodách se dále může vyskytovat oxid uhličitý a v zeminách či podzemních vodách kontaminovaných lidskou činností se vyskytují amonné ionty nebo fenoly.

Kompozit na silikátové bázi, vystavený trvale podzemní vodě, je náchylný ke zhoršení trvanlivosti vlivem útoku vnějších síranů [10]. K urychlení procesu degradace dochází při cyklickém vysoušení a namáčení kompozitu [11]. Síranová koroze je složitý fyzikální a chemický proces [12], jehož součástí jsou mikroskopické procesy – difuze síranů, tvorbu síranových produktů s expanzním charakterem v pórech a kapilárách a s tím spojený vývin krystalizačního tlaku, a makroskopické procesy – postupné rozpádání cementového kamene [13]. Průběh síranové koroze může být velmi rychlý a může mít fatální vliv na životnost stavebního díla, proto je na studium ochrany proti síranové korozi kladen velký důraz a existuje velké množství studií zaměřujících se na predikci jejího průběhu [13], [14], [15]. Podstatný vliv na rychlost síranové koroze má také teplota prostředí [16] a řada výzkumů se zaměřuje na zpomalení degradace částečnou substitucí portlandského cementu vhodnými aditivami či druhotnými surovinami [17], [18]. Pucolánové přísady (vysokoteplotní popílek, křemičité úlety, metakaolin, aj.) mají pozitivní vliv na strukturu cementového kamene, distribuci pórů, a jejich velikost. Avšak i přes tento pozitivní vliv na hutnost cementového kamene může mít příměs pucolánových přísad, dle některých studií [19], [20], [21], negativní vliv na odolnost vůči síranové korozi, přičemž ten se bude prohlubovat s rostoucí mírou přísady.

Chloridové ionty obvykle nepředstavují riziko pro stavební konstrukce z prostého betonu či jiných materiálů na silikátové bázi. Problematickým činitelem jsou v případě, že se jedná o konstrukci vyztuženou ocelí. Vnikají-li chloridové ionty do takového materiálu, způsobují velmi rychlou korozi výztuže, která je doprovázená objemovými změnami. Korozi zpodiny vyvíjejí na okolní silikátovou matici silný expanzní tlak, vedoucí až k narušení struktury cementového kamene a k obnažení výztuže [9]. Výše zmíněný oxid uhličitý se přirozeně rozpouští ve vodě za vzniku kyseliny uhličitě, která reaguje s cementovým tmelem, případně s jakýmkoliv

vápenatým kamenivem [22]. Agresivní oxid uhličitý způsobu tzn. karbonatáci. Jedná se o proces, při které dochází k řadě chemických procesů, které v konečném důsledku vedou ke snížení pH cementového kamene a ke vzniku novotvarů o větším objemu. Tyto korozní zplodiny vyvíjejí expanzní tlak na vnitřní strukturu cementového kamene, což může vést ke ztrátě integrity. Velmi negativní vliv na životnost stavební konstrukce má uhličitánová koroze v kombinaci se síranovou. Liu [19] poukazuje na fakt, že karbonatovaný beton je mnohem náchylnější na síranovou korozi. Zároveň říká, že příměs popílku či mleté strusky snižuje odolnost betonu proti karbonatáci [19].

3 METODIKA

V úvodu zmiňovaný projekt, jehož součástí je i vývoj této injektážní malty, stále probíhá, z toho důvodu je v Tab. 1 uveden pouze orientační podíl vstupních surovin v jednotlivých recepturách. Referenční hmotu (RI-ref) představuje komerčně dostupná injektážní malta na bázi portlandského cementu, která se nevyznačuje žádnou zvýšenou chemickou odolností, resp. surovinové složení není navrženo s důrazem na zvýšení chemické odolnosti.

Tab. 1 Orientační zastoupení jednotlivých surovin v receptuře vyvíjené malty pro rubovou injektáž.

Surovina	Průměrný podíl surovin v receptuře (hm. %)	
Cement CEM I - 42,5 R	28	28
Jemně mletý vápenec	5	10
Živcové odprašky	5	10
Bentonit	5	15
Křemičitý písek 0,125 - 1,0	50	90
Směs přísad (hm. % z m_c)	0,71	1,71

Základní surovinové varianty jejichž výsledky jsou prezentovány v rámci této práce jsou označeny RI-A(B,C). Surovinové složení těchto receptur se liší množstvím krystalizační přísady, která je dávkována v rozmezí 0,25–1,25 hm. % z hmotností cementu (m_c), tedy v receptuře RI-A je obsaženo nejméně krystalizační přísady, naopak v RI-C je největší množství této přísady. V ostatních ohledech je složení surovinových variant podobné složení referenční hmotě (RI-ref). Předpokladem bylo, že příměs krystalizačních přísad bude mít pozitivní vliv na odolnost vyvíjených malt.

V rámci laboratorního zkoušení byl ověřen vliv příměsí krystalizačních přísad na reologické vlastnosti čerstvé injektážní malty (ČSN EN 14117), nasákavost (ČSN 72 2448) a pevnost v tlaku (ČSN EN 1015-11). Dále byla ověřena konzistence čerstvé malty rozlitím (zkušební zařízení dle ČSN EN 1015-3).

Jak bylo uvedeno výše, vyvíjená malta má splňovat požadavky normy DIN 19753 [6]. Tento normativní předpis byl vybrán, jelikož doposud neexistuje souhrnná evropská norma pro návrh a zkoušení kompozitů na cementové bázi pro sanaci chemicky exponovaných stavebních konstrukcí. Výroba zkušebních těles, jejich uložení a zkoušení je v souladu s „Annex C – Test for sulphate resistance“.

Jedná se o zrychlenou laboratorní zkoušku, navrženou k ověřování účinnosti malty. Zkušební tělesa (10x40x160 mm) jsou po dobu 91 dní vystavena působení agresivního síranového roztoku o koncentraci 29,8 g / l (44 g / l Na_2SO_4). Srovnávací referenční tělesa jsou uložena po celou dobu vystavení pouze v nasyceném roztoku $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Na zkušební tělesa jsou upevněny měřicí terče a je změřena jejich vzdálenost „Lo“ (mm) (v souladu s normou ČSN EN 12617-4). Terče jsou umístěny z obou stran zkušebního tělesa, čímž se rozhlední případná expanze v jiném než lineárním směru. Od sedmi dní vystavení agresivnímu prostředí se v pravidelných intervalech zaznamenává změna délky zkušebních těles „L“ (mm). Deformace „c“ zkušebních těles je vypočtena dle vzorce (1). Norma [6] předepisuje maximální přípustnou změnu délky ($\Delta\epsilon < 0.8$ mm), která se stanoví porovnáním zkušebních těles vystavených působení obou prostředí. Roztok Na_2SO_4 se pravidelně po 28 dnech obměňuje.

$$c = \frac{\Delta L \cdot 1000}{L} \quad (\text{mm} / \text{m}) \quad (1)$$

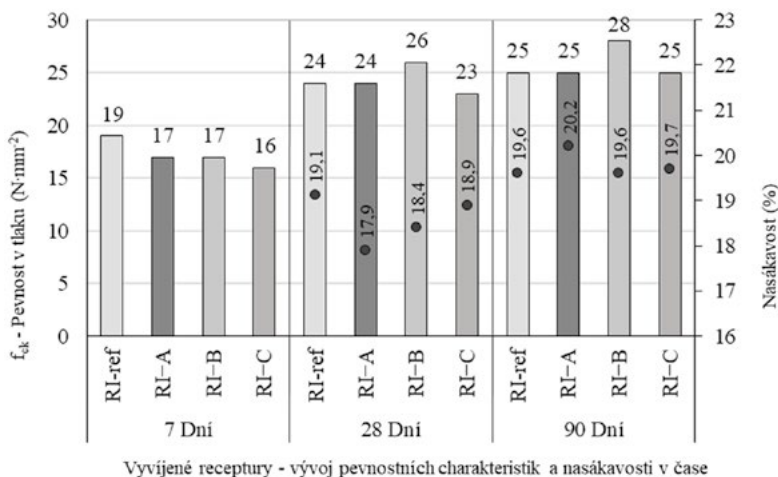
4 VÝSLEDKY

V Tab. 2 jsou uvedeny výsledky základních reologických charakteristik. Vodní součinitel byl volen tak, aby konzistence jednotlivých čerstvých malt surovinových variant odpovídala konzistenci referenční malty (RI-ref), tedy na rozlité 250 ± 5 mm.

Tab. 2 Reologické charakteristiky čerstvých malt jednotlivých surovinových variant.

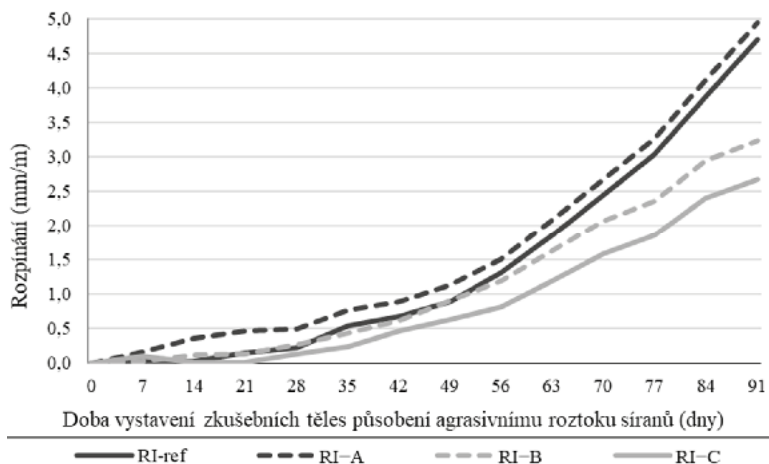
Receptura	Množství záměsové vody (ml / 1 kg)	Doba průtoku (viskozita) (s)	Konzistence (rozliti) (mm)
RI-ref	252	58	250
RI-A	255	85	252,5
RI-B	255	78	255
RI-C	260	80	252,5

Na Obr. 1 jsou graficky vyjádřeny výsledky stanovení pevnosti v tlaku zkušebních těles ($40 \times 40 \times 160$ mm) po 7, 28 a 90 dnech zrání a zároveň nasákavost zkušebních těles po 28 a 90 dnech zrání. Nasákavost zkušebních těles po 7 dnech zrání nebyla stanovena, jelikož zkušební tělesa nabyly dostatečných pevností až po 3–4 dnech zrání, nebyla tedy ve vodním uložení dostatečně dlouho pro optimální nasáknutí.



Obr. 1 Závislosti pevnosti v tlaku a nasákavosti zkušebních těles na době zrání.

Grafické vyjádření expanze (rozpínání) zkušebních těles vystavených působení roztoku Na_2SO_4 po dobu 91 dní je uvedeno na Obr. 2. Výsledky byly zaznamenávány v pravidelném intervalu 7 dní, vyjádřen je tedy průběh rozpínání v čase.



Obr. 2 Grafické vyjádření průběhu deformace zkušebních vzorků vystavených působení síranů v čase.

V Tab. 3 jsou uvedeny konečné výsledky stanovení změny délky ($\Delta\epsilon$) zkušebních těles vystavených po dobu 91 dní síranovému napadání. Délková změna se stanoví porovnáním zkušebních těles vystavených působení obou prostředí.

Tab. 3 Rozdíl v délce $\Delta\epsilon$ mezi testovanými vzorky ponořenými do síranu a referenčními vzorky v $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Receptura	Změna délky $\Delta\epsilon$
	(mm)
RI-ref	4,628
RI-A	4,944
RI-B	3,184
RI-C	2,628

5 DISKUZE

Z výsledků v Tab. 2 je zřejmé, že s rostoucí mírou příměsi krystalizační přísady bylo nutné pro zachování konzistence mírně zvýšit množství záměsové vody. Doba průtoku Marshovým kuzelem se však výrazně prodloužila, a to z 58 sekund (RI-ref) na 78-85 sekund u modifikovaných receptur. Norma ČSN EN 14117 však předepisuje dobu průtoku v rozmezí 40-100 s, hmoty tedy vyhověly požadavku.

Z výsledků na Obr. 1 vyplývá, že příměs krystalizačních přísad neměla u vyvíjených receptur zásadní vliv na pevnost v tlaku. Při srovnání výsledků receptury RI-B a RI-C možné předpokládat, že zvýšení vodního součinitele (RI-C) mělo negativní vliv na snížení pevnosti a zvýšení nasákavosti. Modifikace receptur krystalizační přísadou neměla u těchto charakteristik výrazně pozitivní vliv ani po delší době zrání, což však mohlo být zapříčiněno také horší viskozitou modifikovaných malt a mírným zvýšením vodního součinitele. Významný vliv přídavku krystalizačních přísad na zlepšení zkoušených fyzikálně-mechanických charakteristik nebyl očekáván, avšak byl předpokládám jejich pozitivní vliv na chemickou odolnost.

Tento předpoklad se potvrdil, což vyplývá z výsledků odolnosti zkušebních těles modifikovaných receptur uvedených na Obr. 2. S rostoucí mírou přídavku krystalizační přísady rostla odolnost vůči napadání vnějšími síranu. Nízká dávka krystalizační přísady u receptury RI-A nevedla k žádnému zvýšení odolnosti, avšak dle výsledků receptury RI-B a RI-C lze předpokládat, že při dávce $> 0,5$ hm. % z m_c se začne projevovat pozitivní dopad. Přídavek krystalizační přísady v míře 1,25 hm. % z m_c (RI-C) vedl k omezení objemové expanze zkušebních těles o 56 % ve srovnání z referenční recepturou. Avšak, jak vyplývá z výsledků uvedených v Tab. 3, i přes pozitivní vliv modifikace receptur přídavkem krystalizační přísady na odolnost vůči síranovému napadání, navržené receptury nesplňují požadavek normy DIN 19753 na maximální přípustnou změnu délky ($\Delta\epsilon < 0,8$ mm).

6 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo modifikovat referenční recepturu malty pro rubovou injektáž přídavkem určitého množství krystalizační přísady a ověřit, zda tato úprava surovinové směsi povede k zvýšení odolnosti vůči síranové korozi. Jako rozhodující charakteristika pro výběr optimální surovinové varianty byla odolnost vůči síranům, stanovené dle metodiky normy DIN19753. Dalšími sledovanými charakteristikami byla viskozita čerstvé injektážní malty, pevnost v tlaku a nasákavost zkušebních těles.

Z výsledků uvedených v této práci vyplývá, že přídavkem krystalizační přísady v míře $> 0,5$ hm. % z m_c je možné dosáhnout zlepšení síranové odolnosti. Hodnoty ostatních sledovaných fyzikálně-mechanických charakteristik byly srovnatelné s referenční hmotou, avšak s rostoucí dávkou přísady rostla spotřeba záměsové vody. To mohlo vést k mírnému zhoršení pevnosti v tlaku a nasákavosti.

Zároveň platí, že současné receptury nejsou optimální a ani s přídavkem krystalizační přísady nevyhověly modifikované surovinové varianty požadavky normy DIN 19753. Další směřování výzkumu bude zaměřeno na úpravu surovinového složení modifikovaných receptur, snížení vodního součinitele, či snížení viskozity (stanovované jako doba průtoku viskozimetrem) ze stávajících 80 sekund na 5060 sekund. Pro úpravu surovinového složení budou přidány příměsi s pucolánovým charakterem, mimo jiné budou využity vhodné druhotné suroviny. Předpokladem je, že bude dosaženo zlepšení struktury cementového kamene, obecně snížení pórovitosti a zlepšení distribuce pórů. Zároveň budou nové surovinové varianty testovány také na odolnost vůči působení roztoku H_2SO_4 o molární koncentraci 0,0001 mol / l, tedy roztoku o stupni kyselosti pH = 4.

Poděkování

Článek byl vytvořen z finančních prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu ČR v rámci projektu FV20149 „Ucelený systém pro sanaci chemicky atakovaných a namáhaných stavebních konstrukcí“ a v rámci projektu FAST-J-20-6402 "Vývoj nové chemicky odolné hmoty pro rubovou injektáž kanalizačních stok s využitím vybraných druhotných surovin".

Použité zdroje

- [1] Městské standardy vodovodů a kanalizací na území hl. m. Prahy: Kanalizační část. Praha, 2017.
- [2] Metodika magistrátu města Brna: Městské standardy pro kanalizační zařízení. Brno, 2010.
- [3] ČSN 75 6101, Stokové sítě a kanalizační přípojky, Praha: ČNI, 2012.
- [4] J. Hulla, P. Turček, Zakladanie stavieb, Bratislava: Jaga group, 1998.
- [5] M. Horák, Analýza stárnutí vybraných materiálů stokových sítí, BUT, Brno, 2013.
- [6] DIN 19753, Draft on mortars for construction and rehabilitation sewer system. La Plaine Saint-Denis Cedex, 2017.
- [7] Z. Motyčka, Bentonitové injektáže hornin: Poznámky o zpevňování a těsnění hornin při výstavbě tunelů II, Ostrava, 2001.
- [8] ČSN EN 12715, Provádění speciálních geotechnických prací: Injektáže, Praha: ČNI, 2001.
- [9] BRE CONSTRUCTION DIVISION, Concrete in aggressive ground. 3. ed., Garston, Watford: BRE, 2005.
- [10] Z. Liu, D. Deng, G. de Schutter, Does concrete suffer sulfate salt weathering? Construction and Building Materials. 66 (2014) 692-701.
- [11] F. Xie, J. Li, G. Zhao, P. Zhou, H. Zheng, Experimental study on performance of cast-in-situ recycled aggregate concrete under different sulfate attack exposures, Construction and Building Materials. (2020) 253.
- [12] P.J.M. Monteiro, K.E. Kurtis, Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack, Cement and Concrete Research. 33(7) (2003) 987-993.
- [13] G.J. Yin, X.B. Zuo, X.N. Li, Y.X. Zou, An integrated macro-microscopic model for concrete deterioration under external sulfate attack, Engineering Fracture Mechanics. 240, 2020.
- [14] P. Liu, Y. Chen, W. Wang, Z. Yu, Effect of physical and chemical sulfate attack on performance degradation of concrete under different conditions, Chemical Physics Letters. 745, 2020.
- [15] H. Min, L. Sui, F. Xing, H. Tian, Y. Zhou, An effective transport model of sulfate attack in concrete. Construction and Building Materials. 216 (2019) 365-378.
- [16] A.M. Hossack, M.D.A. Thomas, The effect of temperature on the rate of sulfate attack of Portland cement blended mortars in Na₂SO₄ solution, Cement and Concrete Research. 73 (2015) 136-142.
- [17] N.B. Al-Akhras, Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. Cement and Concrete Research. 36(9) (2006) 1727-1734.
- [18] P. Hou, Z. Guo, Q. Li, et al., Comparison study on the sulfate attack resistivity of cement-based materials modified with nanoSiO₂ and normal SCMs: Pore structure and phase composition. Construction and Building Materials. 228, 2019.
- [19] Z. Liu, W. Hu, L. Hou, D. Deng, Effect of carbonation on physical sulfate attack on concrete by Na₂SO₄, Construction and Building Materials. 193 (2018) 211-220.
- [20] A.R. Suleiman, M.L. Nehdi, Exploring effects of supplementary cementitious materials in concrete exposed to physical salt attack, Magazine of Concrete Research. 69(11) (2017) 576-585.
- [21] M.F. Najjar, M.L. Nehdi, A.M. Soliman, T.M. Azabi, Damage mechanisms of two-stage concrete exposed to chemical and physical sulfate attack, Construction and Building Materials. 137 (2017) 141-152.
- [22] J. Ledererová, et al., Biokorozní vlivy na stavební díla, first ed., Silikátový svaz, Praha, 2009.

VÝVOJ POLYMERNÍ HMOTY S VYSOKÝM OBSAHEM ODPADNÍHO PERLITU

DEVELOPMENT OF POLYMER-BASED MATERIAL WITH HIGH CONTENT OF WASTE PERLITE

Radek Hermann¹

¹Fakulta Stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

Tato práce se zabývá vývojem polymerní hmoty na epoxidové bázi s vysokým obsahem odpadního expandovaného perlitu. Cílem této práce je vytvořit hmotu s vysokými užitnými vlastnostmi při utilizaci co nejvyššího podílu plniva ve formě odpadního expandovaného perlitu, při zachování aplikovatelnosti běžným zednickým způsobem, či litím. V rámci práce jsou testovány základní fyzikálně-mechanické vlastnosti, včetně přídržnosti k podkladu. Výsledná hmota vykazuje vysoké fyzikálně-mechanické vlastnosti i při vyšším stupni plnění, zároveň hmota vykazuje nízkou objemovou hmotnost.

Klíčová slova

Polymerní hmota, epoxid, odpadní perlit, expandovaný perlit

Abstract

This paper deals with the development of an epoxy-based polymer material with a high content of waste expanded perlite. The aim of this work is to create a material with high utility properties in the utilization of the highest possible proportion of filler in the form of waste expanded perlite, while preserving the applicability by the usual masonry method, or by casting. In this paper, the basic physical-mechanical properties, including pull-of adhesion to the substrate. The resulting material exhibits high physical and mechanical properties even at a higher degree of filling, at the same time the mass exhibits low bulk density.

Key words

Polymer-based material, epoxy, waste perlite, expanded perlite

1 ÚVOD

Základním rozdílem mezi běžně užívanými stavebními materiály, sestávajícími především z minerálních pojiv na cementové, vápenné, či jiné bázi, vykazují polymerní materiály zcela odlišné materiálové vlastnosti, a především zcela odlišný růst fyzikálně-mechanických vlastností v čase. Polymerní materiály, na rozdíl od materiálů běžně používaných, dosahují v relativně krátkém čase po přípravě vysokých užitných vlastností. Běžné polymerní hmoty jsou považovány za zpolymerované po sedmi dnech od zamíchání, kdy již vykazují nejvyšší fyzikálně-mechanické vlastnosti, které se s dalším časem zráním nemění. Toto je například s běžnými cementovými hmotami, které zrají, resp. se jejich mechanické vlastnosti zvyšují i po dobu několika let od přípravy nesrovnatelné. Polymerní hmoty velmi často vykazují zcela odlišný poměr mezi pevností v tlaku a mezi pevností za ohybu než běžné hmoty na cementové bázi.

Mezi nejčastěji používaná plniva, která jsou relativně ekonomicky nenáročná, patří například mletý vápenc, křemenná moučka a jiné. Plniva jsou využívány pro zlepšení zpracovatelnosti, jinak tekutých polymerních pojiv, běžnými zednickými metodami, zároveň jsou využívány pro snížení ekonomické náročnosti polymerních kompozitů jako takových, ale je možno cíleně využít některé typy plniv pro úpravu užitných vlastností polymerních materiálů. Mezi nejčastěji používané polymerní materiály patří v dnešní době epoxidové a polyesterové pryskyřice [1].

Zároveň díky velmi vysoké ekonomické náročnosti těchto hmot je vhodné dosáhnout co nejvyšších užitných vlastností při zachování co nejnižší objemové hmotnosti výsledné hmoty. Jednou z možností jako tohoto docílit je využití odpadního expandovaného perlitu z výroby expandovaného perlitu. Expandovaný perlit se vyrábí z těžené horniny perlit. Výroba probíhá za vysokých teplot, kdy dochází k expandujícímu procesu této horniny. Výsledný

produkt dosahuje velmi nízkých objemových hmotností a velmi dobrých tepelně-izolačních vlastností. Expandovaný perlit je využíván jako podsyp při rekonstrukcích historických budov a zároveň např. jako plnivo do termoizolačních omítek.

Při výrobě expandovaného perlitu dochází po expanzi k oddělení jednotlivých frakcí kameniva, či je expandovaný materiál bez jakýchkoli dalších úprav expedován jako finální produkt. Při výrobě expandovaného perlitu dochází k odlučování nejméněších částic pomocí cyklonů a tento materiál je následně výrobcem zachycován a uskladňován. Takto jemný materiál má velmi malé využití v běžném stavebním, či jiném odvětví. Díky svému vysokému měrnému povrchu a velmi vysoké nasákavosti je jeho využití obtížné. Materiál se velmi lehce dostává do vznosu a je obtížně zapracovatelný do běžných hmot.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Využití stavebních materiálů v dnešní době směřuje k využívání stále většího množství polymerních hmot. Toto je dáno především zvýšením nároků na fyzikálně-mechanické vlastnosti stavebních hmot. Zároveň je však toto dáno také požadavkem na velmi malé odstávky při výrobě, nutnost provádět opravy za velmi nízkých venkovních teplot, či díky jiným, např. estetickým nárokům, či předpisům stavebních prací.

V dnešní době se nejčastěji využívá epoxidových a polyesterových pryskyřic. Tyto dosahují velmi vysokých fyzikálně-mechanických vlastností, přídržnosti k betonu a dalším běžně využívaným materiálům, za relativně příznivé ekonomické náročnosti.

Běžné stavební hmoty, které se využívají ve stavebnictví, jsou nejčastěji založeny na cementové, vápenné, či sádrové bázi. Polymerní materiály se ve stavebnictví využívají několika způsoby. Některé druhy polymerů, mezi které patří například polyvinyl alkohol, styren-akrylát, akrylát atd. se využívají pro úpravu vlastností cementových malt a betonů za účelem úpravy užitných vlastností (modifikace modulu pružnosti, přídržnosti). Jiné druhy polymerů, mezi které patří například polyuretany, vinylestery, polyestery, epoxidy se využívají v celé řadě stavebnictví. Od podlahových systémů, přes nátěrové hmoty ocelových konstrukcí až po specializované chemicky odolné hmoty pro chemický průmysl a stokové systémy.

Tyto polymerní hmoty jsou nejčastěji plněny pomocí plniv. Tato plniva se využívají z důvodu snížení ekonomické náročnosti jinak velmi nákladných polymerních materiálů, zároveň také z důvodu úpravy reologických vlastností polymerních pojiv, která jako taková bývají nejčastěji velmi nízko-viskózní a nemohou být bez dalších úprav použity běžným zednickým způsobem.

Současné trendy mají tendenci opouštět od využívání primárních plniv, mezi které patří křemenná moučka, křemičitý písek, mikromletý vápenc a další plniva. Výrobci stavebních hmot v dnešní době využívají čím dál více druhotné a odpadní suroviny. Toto má za následek snížení ekonomické náročnosti vyráběných hmot, ale také zvýšení poptávky po těchto produktech, z důvodu orientace dnešních zákazníků na environmentálně-příznivé výrobky.

3 MATERIÁLY A METODIKA

V rámci této práce byla využita epoxidová pryskyřice s polyamidoaminovým tvrdidlem. Tato byla následně plněna odpadním perlitem. Epoxidová pryskyřice byla dávkována jako dvoukomponentní. Složka A - pryskyřice, a složka B - tvrdidlo. Poměr míchání složky A:B byl stanoven na 60:40 hmotnostně. Perlit využitý pro tuto práci byl dodán místním producentem expandovaného perlitu. Frakce použitého expandovaného perlitu se pohybovala v rozmezí 0-1 mm s největším zastoupením zrn mezi 40-200 μm .

Epoxidová pryskyřice

Pro výzkum v rámci této práce byla použita běžná epoxidová pryskyřice, která je vyrobena kombinací bisfenolu A a F. K této pryskyřici bylo použito polyamidaminové tvrdidlo pro zaručení dobré přídržnosti k suchým ale také vlhkým podkladům. Dle informací výrobce byla minimální doba zpracovatelnosti použité epoxidové pryskyřice (uváděná také jako pot life) 15 minut. Hustota pryskyřice smíchané s tvrdidlem byla 1,05 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Viskozita pojiva byla 500-900 mPas.

Odpadní expandovaný perlit

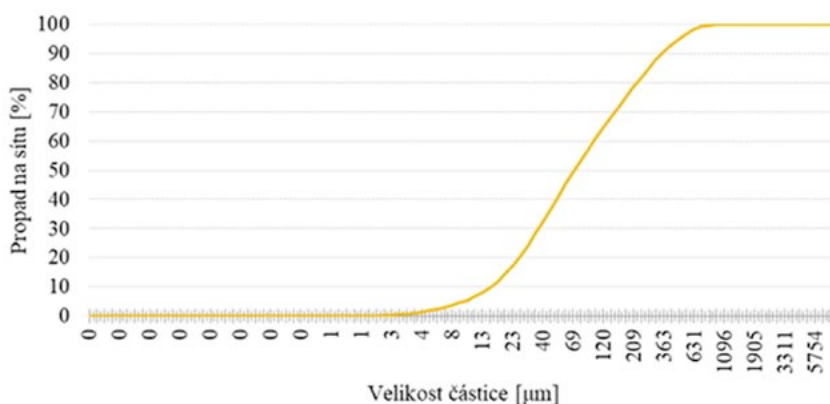
V rámci této práce bylo využito odpadního perlitu dodaného místním výrobcem expandovaného perlitu. Perlit je hornina s vysokým obsahem SiO_2 , která je těžena v povrchových dolech. Tato hornina obsahuje relativně velké množství vody (mezi 2-5 %). Při zahřátí na více než 900 $^{\circ}\text{C}$ dochází k uvolňování této vody a k expanzi zrn

horniny na čtyř až dvacetinásobek původní velikosti zrna. Výsledkem tohoto expanzního procesu je kamenivo s velmi nízkou objemovou hmotností a vysokým obsahem mikropórů.

Díky vzniku tohoto materiálu za vysokého žáru, vykazuje tento materiál velmi vysokou protipožární odolnost, ale také velmi dobré tepelně-izolační vlastnosti. Materiál má velmi nízkou pevnost v tlaku a využívá se nejčastěji jako podsyp při rekonstrukcích historických objektů, zároveň také jako plnivo termo-izolačních a sanačních omítek. Materiál vykazuje velmi vysokou nasákavost. Tato se může pohybovat v rozmezí 100-400 %. Expandovaná hornina nabývá barevných odstínů původní horniny, která přechází z odstínů bílé až po šedou, či hnědou.

Při výrobě expandovaného perlitu se využívá velkého plynového hořáku. Žár prochází šachtou, do které je vsypávána hornina, která je následně unášena spolu s proudem žhavého vzduchu. Během několika málo vteřin dojde k expanznímu procesu a zrna expandovaného perlitu jsou zachycována na konci potrubí. Nejmenší částí odchází dále do cyklonů a filtrů, kde je prach zachycován. Takovýto odpad je velmi těžce využitelný a někteří výrobci ho v současné době skládají, či skladují, dokud se pro tento materiál nenajde vhodné využití. Tento materiál lze využít jako náhrada cementu v cementových kompozitech, či jako přísma při výrobě autoklávovaného pórobetonu [2], [3], [4], [5], [6].

V následujícím grafu na Obr. 1 je vyobrazen síťový rozbor použitého odpadního expandovaného perlitu.



Obr.1 Sítový rozbor použitého odpadního perlitu.

Odpadní perlit použit v této práci pochází od místního výrobce expandovaného perlitu, který využívá horninu z Maďarska. Barva použitého perlitu je bílá, ačkoliv, jak je zmíněno výše, barva může být žlutá, až hnědá. Připravené vzorky obsahující odpadní expandovaný perlit mají nažloutlou barvu díky barvě použitého epoxidu. Ten má jasně žlutou barvu.

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny vzorky pro stanovení přídržnosti k podkladu dle ČSN EN 1542:1999. Barva vzorku korespondovala s mírou plnění kompozitu, jak lze pozorovat na následujících obrázcích. Na Obr. 2 je vyobrazen vzorek s plněním 20 % hm. odpadním expandovaným perlitem. Na Obr. 3 je vzorek s 14% plněním odpadním expandovaným perlitem [7].



Obr. 2 Fotografie vzorků pro stanovení přídržnosti k podkladu 20% plnění.



Obr. 3 Fotografie vzorku pro stanovení přídržnosti k podkladu 14% plnění.

Receptury

V rámci této práce byly stanoveny materiálové vlastnosti polymerního kompozitu připraveného ve třech mírách plnění odpadním expandovaným perlitem. Receptury byly stanoveny pro co nejvyšší míru plnění při zachování zpracovatelnosti zednickým způsobem či litím a zároveň s dostatečnými rozdíly mezi jednotlivými mírami plnění pro zobrazení dostatečného rozdílu mezi jednotlivými recepturami.

Oproti míře plnění běžnými plnivými, kdy je možné dosáhnout až 90% hmotnostního naplnění (poměr plniva ku pojivu), lze u tohoto typu plniva, především díky jeho velmi nízké objemové hmotnosti dosáhnout plnění pouze 17-20 %. V Tab. 1 jsou uvedeny použité receptury.

Tab. 1 Receptury polymerního kompozitu.

Míra plnění	14 %	17 %	20 %
Epoxidová pryskyřice [hm. %]	51,3	49,5	47,7
Tvrdidlo [hm. %]	34,7	33,5	32,3
Expandovaný odpadní perlit [hm. %]	14,0	17,0	20,0

Metody

Při přípravě hmot byla nejprve smíchána epoxidová pryskyřice s tvrdidlem. Hmotu byla důkladně promíchána pomaloběžným laboratorním míchadlem upevněným do stojanové vrtačky. Následně bylo pomalu přidáváno plnivo pro zajištění homogenity celé směsi. Použité plnivo, odpadní expandovaný perlit mělo tendenci při jakémkoliv přídavku do hmoty tvořit ve hmotě shluky, které byly obtížně rozmíchatelné. Hmotu musela být míchána po dobu nejméně 4 minut pro dokonalé zhomogenizování celé směsi.

Zpracovatelnost/Viskozita

Zpracovatelnost čerstvé směsi se lišila dle míry plnění. Při 14% plnění bylo možno hmotu aplikovat ihned po zamíchání litím, kdežto při 20% plnění již byla hmotu aplikovatelná pouze velmi obtížně zednickým způsobem.

U všech směsí docházelo k výrazné ztrátě viskozity během několika desítek vteřin po zamíchání. Pro opětovné zlepšení zpracovatelnosti by bylo nutné provést další míchání.

Pevnost v tlaku a v tahu za ohybu

Pevnost v tlaku a v tahu za ohybu byla stanovována na vzorcích o rozměrech 20x20x100 mm. Pevnost v tlaku byla stanovována v souladu s ČSN EN 13892-2:2003 na vzorcích po stanovení pevnosti v tahu za ohybu pomocí přílozek o velikosti 20x20 mm pro rovnoměrné rozložení síly laboratorního lisu po celé ploše vzorku. Pevnost v tahu za ohybu byla stanovována třibodovým ohybem. Zkušební vzorky byly vyrobeny v počtu 3 ks od každé receptury. Vzdálenost podpor byla 80 mm [8].

Přídržnost k podkladu

Přídržnost k podkladu byla stanovována pomocí laboratorního odtrhoměru na vzorcích aplikovaných na předem připravený prefabrikovaný betonový vzorek dlaždice. Přídržnost k podkladu byla provedena po 7 dnech od zamíchání. Přídržnost k podkladu byla provedena v souladu s ČSN EN 1542:1999. Polymerní hmotu byla nanášena ihned po zamíchání zednickým způsobem pomocí špachtle v tloušťce přibližně 3 mm. Zkušební vzorky byly vyrobeny v počtu 3 ks od každé receptury. Zráním polymerní hmoty probíhalo v laboratorním prostředí [7].

Objemová hmotnost

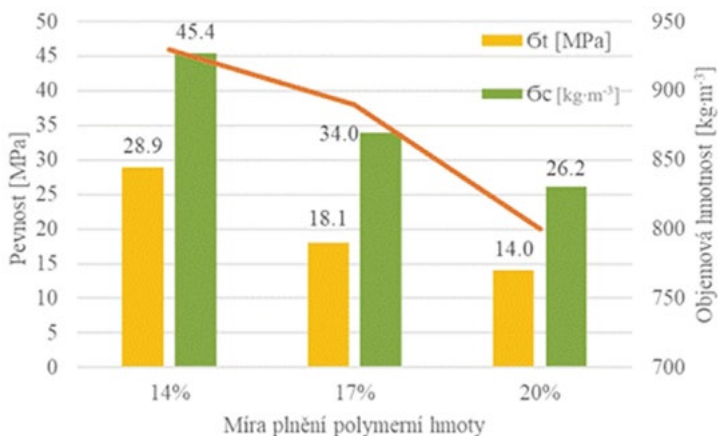
Objemová hmotnost připravených těles byla stanovována v souladu s ČSN EN ISO 845. Objemová hmotnost byla stanovena na laboratorních vzorcích o rozměrech 20x20x100 mm před stanovením pevnosti v tahu za ohybu [9]. Zkušební vzorky byly vyrobeny v počtu 3 ks od každé receptury.

4 VÝSLEDKY

V této kapitole jsou popsány výsledky dosažené v rámci této práce.

Pevnost v tlaku a tahu za ohybu / objemová hmotnost

Pevnosti v tlaku a tahu za ohybu jsou znázorněny v kombinaci s objemovou hmotností na Obr. 4.



Obr. 4 Pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost

Na výše uvedeném obrázku obr. 4 je graficky znázorněna pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost vzorků polymerní malty. Z grafu vyplývá, že se zvyšující se mírou plnění dochází k výraznému snížení pevnostních charakteristik hmoty a také ke snížení objemové hmotnosti.

Přidrženost k podkladu

Přidrženost k podkladům testovaných vzorků byla stanovena pomocí ručního laboratorního odtrhoměru DYNA. U všech testovaných vzorků došlo k porušení v podkladu při pevnosti vyšší než 3,0 MPa. Síla přidrženosti může být tedy kategorizována dle přidrženosti k podkladu jako R4 – opravy se statickou funkcí dle ČSN EN 1504-3 [10]. Zbýlé požadavky na hmoty dle R4 – opravy se statickou funkcí nebyly v rámci této studie stanoveny.

5 ZÁVĚR

V rámci této práce byla studována možnost využití odpadního expandovaného perlitu z výroby expandovaného perlitu v polymerních maltách. Využito bylo odpadního expandovaného perlitu o zrnitosti 0-1 mm v kombinaci s epoxidovou pryskyřicí s PAA tvrdidlem. V rámci práce bylo zjištěno, že odpadní expandovaný perlit lze využít jako vhodné plnivo polymerních malt a to až do 17 % hmotnostního plnění. Dále bylo zjištěno, že odpadní perlit výrazným způsobem zhoršuje způsob přípravy polymerní malty a zároveň bylo zjištěno, že po ukončení míchání, dochází během několika desítek vteřin k výraznému zhoršení zpracovatelnosti.

V rámci práce bylo dále zjištěno, že se zvyšující se dávkou odpadního expandovaného perlitu dochází ke zhoršení fyzikálně-mechanických vlastností hmoty. Především dochází ke snižování pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu. Dále bylo zjištěno, že v rámci testovaných stupňů plnění nedošlo k poklesu přidrženosti k betonu níže než na tahovou soudržnost testovaného betonu, tedy je velký předpoklad, že je hmota vhodná pro strukturální opravy betonových konstrukcí.

Poděkování

Tento článek byl vypracován za podpory projektu č. FAST-J-20-6423 „Studium fyzikálně-mechanických vlastností novodobých silikátových a polymerních kompozitů se zaměřením na sledování objemových změn“.

Použité zdroje

- [1] SHAW, J.D.N. Resins in construction. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1985, 7(4), 217-223. ISSN 02625075.
- [2] MLADENOVÍČ, A., J.S. ŠUPUT, V. DUCMAN a A.S. ŠKAPIN. Alkali-silica reactivity of some frequently used lightweight aggregates. *Cement and Concrete Research*. 2004, 34(10), 1809-1816. ISSN 00088846.
- [3] JEDIDI, Malek, Omrane BENJEDDOU a Chokri SOUSSI. Effect of Expanded Perlite Aggregate Dosage on Properties of Lightweight Concrete. *Jordan Journal of Civil Engineering*. 2015, 9(3), 378-391. ISSN 19930461.
- [4] CHANDRA, Satish a Leif BERNTSSON. Production of Lightweight Aggregates and Its Properties. *Lightweight Aggregate Concrete*. Elsevier, 2002, 2002, s. 21-65. ISBN 9780815514862.
- [5] KOTWICA, Łukasz, Waldemar PICHÓR, Ewa KAPELUSZNA a Agnieszka RÓŻYCKA. Utilization of waste expanded perlite as new effective supplementary cementitious material. *Journal of Cleaner Production*. 2017, 140, 1344-1352
- [6] RÓŻYCKA, Agnieszka a Waldemar PICHÓR. Effect of perlite waste addition on the properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*. 2016, 120, 65-71. ISSN 09500618.
- [7] ČSN EN 1542: Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Zkušební metody - Stanovení soudržnosti odtrhovou zkouškou Praha: Český normalizační institut, 1999. ČSN EN 1542.
- [8] ČSN EN 13892-3: Zkušební metody potěrových materiálů - Část 3: Stanovení odolnosti proti obrusu metodou Böhme. 2014. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [9] ČSN EN ISO 845: Lehčené plasty a pryže - Stanovení objemové hmotnosti. 1/10. Praha, 2010.
- [10] ČSN EN 1504-3: Výrobky a systémy pro ochranu a opravy betonových konstrukcí - Definice, požadavky, kontrola kvality a hodnocení shody - Část 3: Opravy se statickou funkcí a bez statické funkce. 8/06. 2006.

VYUŽITÍ FLUIDNÍHO ÚLETOVÉHO POPÍLKU JAKO SUBSTITUCE POJIVOVÉ SLOŽKY PÓROBETONU

EXPERIMENTAL STUDIES ON AUTOCLAVED AERATED CONCRETE USING CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTION FLY ASH

Pavína Ondříčková^{*,1}, Rostislav Drochytka¹

*sebestova.p@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Výzkum se zabývá možností maximálního využití fluidního úletového popílku v technologii pórobetonu a jeho dopadem na vlastnosti pórobetonu. Při výzkumu byl popílek využíván jako substituce pojivové složky v pórobetonu a množství substituce se pohybovalo ve škále od 10 % do 100 %. Na autoklávaných vzorcích byly stanoveny fyzikálně-mechanické vlastnosti, jako je pevnost v tlaku a objemová hmotnost. Dále byla provedena analýza XRD, díky které bylo pozorováno množství krystalického tobermoritu ve vzorcích. Množství tobermoritu bylo konstantní do 50% substituce fluidním popílkem. Pevnost v tlaku začala také výrazně klesat při překročení 50% hranice substituce fluidního popílku. Z dosažených výsledků tedy vyplývá, že maximální substituce fluidního úletového popílku je možná do 50 %.

Klíčová slova

Pórobeton, fluidní úletový popílek, tobermorit, substituce, redukce emisí

Abstract

The research deals with the possibility of maximum utilization of circulating fluidized bed combustion (CFBC) fly ash in autoclaved aerated concrete (AAC) technology and its impact on the properties of AAC. In the research, fly ash was used as a partial substitute for quicklime in the AAC formulation. The amount of substitution ranged from 10 % to 100 %. Physical-mechanical properties such as compressive strength and bulk density were determined on autoclaved samples. Further, XRD analysis were performed, due to which the amount of crystalline tobermorite in the samples was observed. The amount of tobermorite was constant up to 50% by CFBC fly ash substitution. The compressive strength also began to decrease significantly when the 50% CFBC fly ash substitution limit was exceeded. The results clearly show the possibility of using fly ash up to 50% substitution.

Key words

AAC, CFBC fly ash, tobermorite, substitution, emission reduction.

1 ÚVOD

Jedním z výrazných zdrojů emisí oxidu uhličitého ve stavebnictví je výroba portlandského cementu a vápna [1], [2], [3]. Tyto základní pojivové suroviny se využívají při výrobě pórobetonu a hledání jejich náhrady v technologii výroby pórobetonu je málo popsaným tématem. Jedním z možných řešení náhrady cementu a vápna může být využití fluidního popílku.

Z toho důvodu se výzkum zabývá možností využití fluidního úletového popílku jako pojivové složky pórobetonu namísto vápna a cementu. Náhrada pojivové složky se pohybuje v rozmezí 10 %–100 % po 10 %. Provedené zkoušky byly rozděleny do dvou skupin, fyzikálně-mechanické vlastnosti a mikrostruktura pórobetonu.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Fluidní popílky vznikají při spalování ve fluidních ohništích při teplotě 850 °C. Tato teplota spalování je nižší než teplota tavení popílku, proto nedochází k protavování částic a zrna zůstávají porézní. Při spalování vznikají dva druhy popílků, ložový a úletový. Úletový popílek je z kotle odnášen se spalinami a je zachycován

na elektroodlučovačích. Ložový popel je hrubší frakce oproti úletovému popílku. Je to způsobeno jeho vznikem, kdy těžší tuhé zbytky ze spalování nejsou odnášeny zároveň se spalínami, ale jsou v odlučovači vráceny zpět do kotle. Odtud je ložový popel odsáván, aby se udržela konstantní fluidní vrstva spalování. Následně je zchladen a uložen v sílech. Oproti úletovému popílku se také liší svým chemickým složením, kdy ložový popel obsahuje vyšší poměr volného vápna [4], [5], [6]. Fluidní popílek tuhne a tvrdne z důvodu reakce aktivních složek pucolánu s hydroxidem vápenným [7].

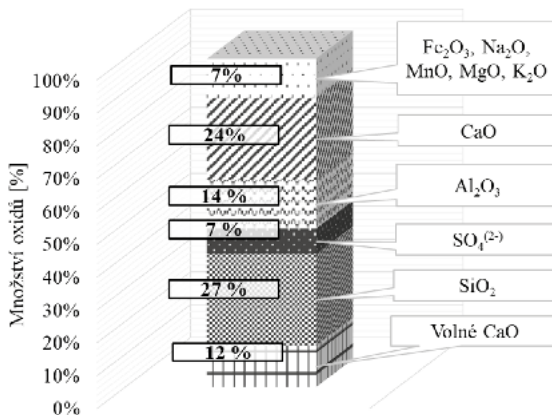
Literatura popisuje využití fluidního úletového popílku jako náhrady portlandského cementu v cementových kompozitech, kde se využívá právě jeho pojivových vlastností [8]. V cementových kompozitech je ale použití fluidního popílku velmi omezené z důvodu vysokého obsahu oxidu siřičitého a volného vápna [9]. V popílku je oxid siřičitý obsažen v podobě síranu vápenatého (II-anhydrit), který při styku s vodou reaguje a zvětšuje mnohonásobně svůj objem a může zapříčinit vznik trhlin v materiálu. V neposlední řadě reaguje síran vápenatý s oxidem hlinitým a hydroxidem vápenným za vzniku ettringitu, který zvětšuje svůj objem až o 125 % [8], [10], [11], [12]. Tyto negativní vlastnosti popílku lze eliminovat pomocí autoklávovacího procesu [12].

3 METODIKA

Suroviny

Pórobeton se skládá z písku, vápna, cementu a hliníkového prášku. Tyto základní suroviny se mísí s vodou a vzniká pórobetonová suspenze. Pomocná surovina podporující vznik tixotropní struktury a krystalizaci nových fází je sádrovec. V dnešní době se již v technologii výroby pórobetonu využívá energosádrovec namísto přírodního sádrovce. Ve výzkumu je tedy využit energosádrovec, který dosahuje vysoké čistoty ($\text{CaSO}_4 < 95\%$). Písek byl vybrán s ohledem na jeho vysoké množství oxidu křemičitého ($\text{SiO}_2 < 98\%$) a lze ho nazvat křemičitým pískem.

Výzkum je zaměřen na vliv substituce vápna pomocí fluidního úletového popílku. Na popílek je provedena chemická analýza a výsledky jsou na Obr. 1.



Obr. 1 Chemické složení fluidního úletového popílku.

Fluidní úletový popílek byl vybrán s ohledem na vysoký obsah volného vápna, které je nezbytné pro průběh hydrotermálních reakcí. Mineralogické složení fluidního popílku je anhydrid, křemen, kalcit a vápno.

Příprava vzorků

Pórobetonové vzorky byly vyrobeny o velikosti $100 \times 100 \times 100$ mm. Surovinová směs se skládá z 5 % vápna, 8 % cementu, 52 % křemičitého písku, 0,05 % hliníkového prášku a 2 % energosádrovce. Množství vody bylo konstantní a vodní součinitel byl stanoven na 0,52. Fluidní popílek představuje náhradu suché pojivové složky (cement, vápno) v rozmezí 10–100 %.

Vápno, cement a fluidní úletový popílek byly za sucha homogenizovány. Z hliníkového prášku a odmašťovací přísady byla vytvořena suspenze. Dalším krokem byla výroba sádrovcovo-pískové suspenze o teplotě $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Do sádrovcovo-pískové suspenze byla přidána suchá směs a následně hliníková suspenze. Směs byla vliata do forem a po 24 hodinách se vzorky odformovaly. Vzorky byly autoklávovány v laboratorním autoklávu v prostředí nasycené vodní páry. Doba hydrotermální výdrže byla stanovena na 7 hodin a teplota na 190 °C.

Metody

Pevnost v tlaku byla stanovena na vysušených vzorcích, které se sušily v laboratorní sušárně při (105 ± 5) °C. Zkouška byla provedena podle normy ČSN EN 679 „Stanovení pevnosti v tlaku autoklávovaného pórobetonu“. Zkušební těleso se vloží do lisu ve směru kolmém na růst hmoty a je zatěžováno stálou rychlostí $(0,1 \pm 0,05)$ MPa/s. Velikost zkoušených těles byla $100 \times 100 \times 100$ mm. Objemová hmotnost byla stanovena po vzoru normy ČSN EN 678 „Stanovení objemové hmotnosti v suchém stavu autoklávovaného pórobetonu“. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost byly provedeny vždy na 6 vzorcích.

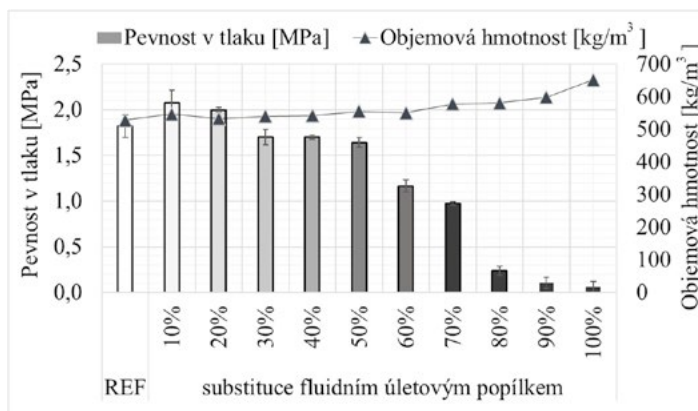
Teplota směsi byla měřena pomocí průmyslového teploměru s čidlem 300 mm DT-34 pro měření teploty od -100 °C do 270 °C s přesností 0,1°C. Měření probíhalo v uzavřené komoře s interní teplotou (21 ± 1) °C. Zaznamenání teploty probíhalo po 60 sekundách.

X-ray difrakční analýza (XRD) byla provedena pomocí přístroje Epyrean Panalitcal (Cu-cathode, $\lambda=1,540598$ pro $K\alpha$ 1). Ze vzorků byla vyříznuta jádra, která byla pomocí vibračního mlýna v první fázi přípravy vzorků na studii mikrostruktury rozemleta na velikost maximálně 0,1 mm. Rozemletý vzorek byl dále mlet v isopropanolové suspenzi s přísádkem srovnávacího standartu v mlýně MC Microne na velikost zrn $<0,02$ mm.

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

Fyzikálně-mechanické vlastnosti

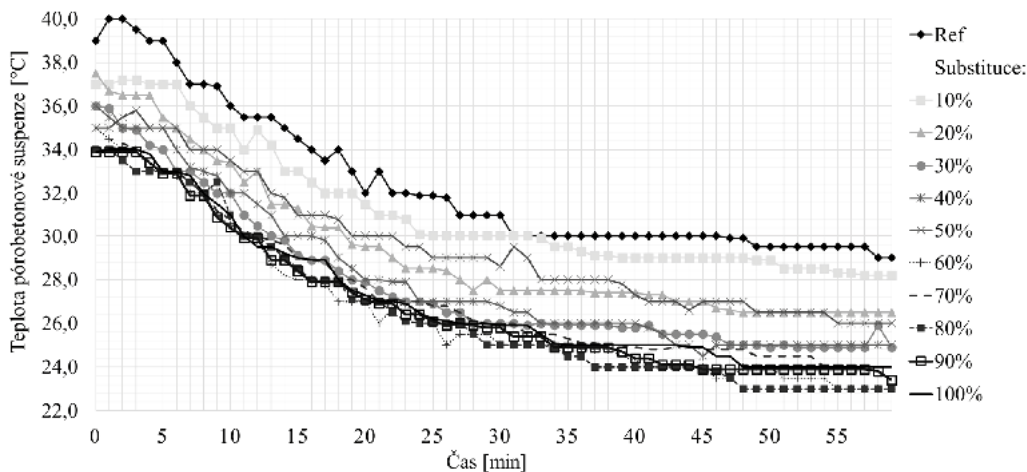
Z fyzikálně mechanických vlastností byla analyzována pevnost v tlaku, objemová hmotnost a teplota čerstvé směsi in průběhu 60 minut. Z výsledků dosavadních výzkumů se očekává pokles pevnosti v tlaku se zvyšujícím se obsahem fluidního úletového popílku [10], [11], [13].



Obr. 2 Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorků s 10–100 % substitucí pojivové složky fluidním úletovým popínkem.

Pevnost v tlaku a objemová hmotnost jsou zobrazeny na Obr. 2. Pevnost v tlaku vzorků je nejvyšší při 10% substituci fluidním úletovým popínkem. Při vzrůstající substituci pevnost lehce klesá. Vzorek s 30% substitucí fluidním úletovým popínkem dosahuje nižších pevností než referenční vzorek. Pozvolné klesání pevností pokračuje až do 50% substituce fluidním úletovým popínkem.

Do této hranice lze konstatovat, že vzorek ztrácí minimálně na své pevnosti a je to tedy hranice maximálního využití. Tato hranice je překvapivě vysoká. Do této hranice se předpokládá vznik krystalických kalcium hydrogen silikátových fází souběžně se vznikem amorfních kalcium hydrogen silikátových fází, které plní funkci pojivové matrice zrn křemičitého písku. Nad 50% substitucí již pevnost razantně klesá a při 100% substituci je téměř nulová. Nad 50% substitucí se tedy již nepředpokládá vznik krystalických kalcium hydrogen silikátových fází. Objemová hmotnost vzorků i přes snižující se pevnosti stoupá. Tento trend poukazuje na vyšší objemovou hmotnost nekystalických kalcium hydrogen silikátových fází vzniklých za přítomnosti fluidního úletového popílku [13].

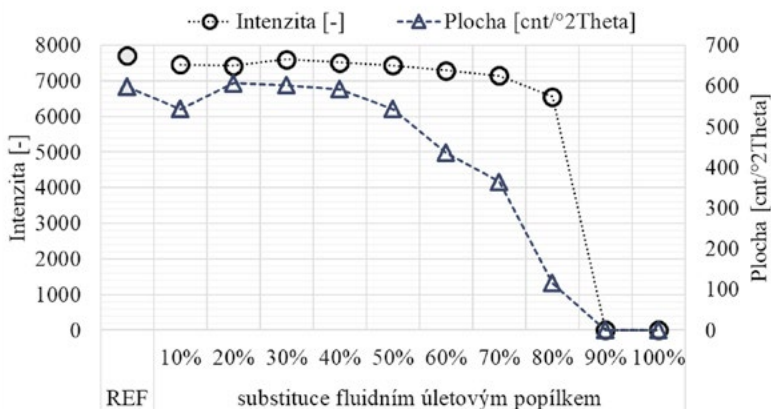


Obr. 3 Průběh teplot pórobetonové suspenze při substituci pojivové složky fluidním úletovým popílkem.

V Obr. 3 lze vidět průběh teploty směsi při substituci fluidním úletovým popílkem. Referenční vzorek dosahuje nejvyšší teploty směsi. Je to způsobeno nejvyšším obsahem volného vápna, které při smísení s vodou vyvolává exotermní reakci. Při vyšší substituci fluidním úletovým popílkem klesá počáteční i konečná teplota směsi. Lze tedy konstatovat, že teplota směsi je závislá na množství obsahu fluidního úletového popílku.

Mikrostruktura

Mikrostruktura vzorku byla sledována pomocí XRD analýzy. Kvalita krystalických fází významně ovlivňuje fyzikálně-mechanické vlastnosti pórobetonu [14]. XRD analýza byla vyhodnocena jako intenzita difrakční linie tobermoritu a jeho plocha pod difrakční linií. Výsledky mikrostruktury jsou zobrazeny na Obr. 4.



Obr. 4 Intenzita difrakční linie tobermoritu a plocha pod difrakční linií vzorků se substitucí pojivové složky fluidním úletovým popílkem.

Intenzita difrakční linie tobermoritu je konstantní do 40% substituce fluidním úletovým popílkem a do 80% substituce pouze lehce klesá. Z těchto výsledků vyplývá, že fluidní úletový popílek neovlivňuje krystalizaci tobermoritu. Tento výsledek je překvapivý s ohledem na klesající pevnosti vzorků a neprokazuje tedy závislost na fyzikálně mechanických vlastnostech.

Naopak plocha difrakční linie tobermoritu koreluje s výsledky pevností v tlaku. Do 50% substituce fluidním úletovým popílkem můžeme pozorovat stejné nebo mírně snížené množství tobermoritu ve vzorku ale od 50% již množství tobermoritu razantně klesá. Při 90% a 100% substituci fluidním úletovým popílkem se již tobermorit

ve vzorku nevyskytuje. Z dosažených výsledků je tedy patrné, že důležitým ukazatelem kvality pórobetonu je množství tobermoritu.

Množství tobermoritu jak již bylo napsáno je do 50% substituce fluidním úletovým popílkem téměř konstantní. Z hlediska konverze amorfních kalcium hydrogen silikátových fází na krystalické kalcium hydrogen silikátové fáze se však mění vstupní podmínky. Snížení obsahu oxidu vápenatého predikuje snížení tvorby krystalických fází. Fluidní úletový popílek musí tedy dostatečně nahrazovat jak vápennou složku v podobě hydroxidu vápenatého, tak cementovou složku v podobě slínku. Obsah hydroxidu vápenatého ve fluidním úletovém popítku se pohybuje v rozmezí 14-38 %. Z hlediska hydrotermální reakce je tedy takovéto množství dostatečné pro tvorbu kalcium hydrogen silikátových fází. Cementovou složku fluidní úletový popílek může zastoupit díky reakce aktivních složek pucolánu s hydroxidem vápenným.

5 ZÁVĚR

Výzkum se zabýval studiem možnosti náhrady vápna a cementu pomocí fluidního úletového popílku. Z dostupných výsledků vyplívá:

- Možnost náhrady vápna a cementu v technologii výroby pórobetonu pomocí fluidního úletového popílku je možné až do 50 %.
- Do 50% substituce pojivové složky fluidním úletovým popílkem je zachována stejná nebo mírně snížená hodnota pevnosti v tlaku oproti referenčnímu vzorku.
- Do 50% substituce pojivové složky fluidním úletovým popílkem je zachován nebo jen mírně snížen obsah tobermoritu v pórobetonu.
- S nárůstem substituce pojivové složky fluidním úletovým popílkem roste objemová hmotnost pórobetonu.

Výsledky ukázaly vysoký potenciál využití fluidního úletového popílku v technologii výroby pórobetonu.

Poděkování

Článek byl vytvořen v rámci řešení juniorského specifického výzkumu s označením FAST-J-20-6165 „Výzkum možnosti substituce pojivové složky vápeno-silikátových kompozitů pomocí alternativních surovin“.

Použité zdroje

- [1] MOUMIN, Gkiokchan, Maximilian RYSEL, Li ZHAO, Peter MARKEWITZ, Christian SATTLER, Martin ROBINIUS a Detlef STOLTEN. CO2 emission reduction in the cement industry by using a solar calciner. *Renewable Energy* [online]. 2020, 145, 1578-1596 [cit. 2020-11-13]. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2019.07.045
- [2] HE, Zhijun, Xiaodong ZHU, Junjie WANG, Mulan MU a Yuli WANG. Comparison of CO2 emissions from OPC and recycled cement production. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, 211, 965-973 [cit. 2020-11-13]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.289
- [3] SHAN, Yuli, Zhu LIU a Dabo GUAN. CO2 emissions from China's lime industry. *Applied Energy* [online]. 2016, 166, 245-252 [cit. 2020-11-13]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2015.04.091
- [4] Ministerstvo životního prostředí [online]. MZP, 2015 [cit. 2018-01-11]. Dostupné z: http://www.env.cz/cz/integrovana_prevence_omezovani_znecistovani
- [5] OPRAVIL, T. Příprava kompozitů netradičního složení na bázi tuhých zbytků fluidního spalování uhlí. Brno, 2005. Diplomová práce, FCH VUT.
- [6] ČEZ [online]. Copyright, 2018 [cit. 2018-01-11]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/cr/porici.html>
- [7] THOMAS, M., R. JEWELL a R. JONES. Coal fly ash as a pozzolan. *Coal Combustion Products (CCP's)* [online]. Elsevier, 2017, 2017, s. 121-154 [cit. 2020-11-13]. ISBN 9780081009451. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-100945-1.00005-8
- [8] GAZDIČ, Dominik, Marcela FRIDRICOVÁ, Karel KULÍSEK a Ludmila VEHOVSKÁ. The Potential Use of the FBC Ash for the Preparation of Blended Cements. *Procedia Engineering* [online]. 2017, 180, 1298-1305 [cit. 2020-11-13]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.04.292
- [9] VALMARI, Tuomas, Esko I. KAUPPINEN, Juha KURKELA, Jorma K. JOKINIEMI, George SFIRIS a Hannu REVITZER. Fly ash formation and deposition during fluidized bed combustion of willow. *Journal of Aerosol Science* [online]. 1998, 29(4), 445-459 [cit. 2020-11-13]. ISSN 00218502.

- Dostupné z: doi:10.1016/S0021-8502(97)10021-0
- [10] ZHANG, Zhiwei, Jueshi QIAN, Chao YOU a Changhua HU. Use of circulating fluidized bed combustion fly ash and slag in autoclaved brick. *Construction and Building Materials* [online]. 2012, 35, 109-116 [cit. 2020-11-13]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.03.006
- [11] CHI, Maochieh. Synthesis and characterization of mortars with circulating fluidized bed combustion fly ash and ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, 123, 565-573 [cit. 2020-11-13]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.071
- [12] ZHANG, Zhiwei, Jueshi QIAN, Chao YOU a Changhua HU. Use of circulating fluidized bed combustion fly ash and slag in autoclaved brick. *Construction and Building Materials* [online]. 2012, 35, 109-116 [cit. 2020-11-13]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.03.006
- [13] SONG, Yuanming, Chuanchuan GUO, Jueshi QIAN a Tian DING. Effect of the Ca-to-Si ratio on the properties of autoclaved aerated concrete containing coal fly ash from circulating fluidized bed combustion boiler. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, 83, 136-142 [cit. 2020-11-13]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.02.077
- [14] NARAYANAN, N. a K. RAMAMURTHY. Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2000, 22(5), 321-329 [cit. 2020-11-13]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/S0958-9465(00)00016-0

VYUŽITÍ METODY SOL-GEL PRO VÝROBU BEZCEMENTOVÝCH ŽÁROBETONŮ

USE OF THE SOL-GEL METHOD FOR THE PRODUCTION OF NO CEMENT CASTABLES

David Zemánek^{*1}, Lenka Nevřivová¹

^{*}zemanek.d@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Veverí 95, 602 00 Brno

Abstrakt

Tento článek se zabývá možností využití metody sol-gel při výrobě bezcementových žárovzdorných betonů. Nejčastěji používané žárobetony jsou spojeny hlinitanovým cementem. Hlavním důvodem pro nahrazení tradiční hydraulické vazby je snížení obsahu oxidu vápenatého, který především způsobuje vznik nízkotavitelných fází při výpalu. V experimentální části je navržen základní jemnozrnný matrix, který je doplněn různými typy ostřiv. Koloidní roztok SiO₂ jako náhrada hydraulické vazby je použit s komerčně dostupným gelačním činidlem. Cílem tohoto článku je vývoj bezcementového žárobetonu založeného na metodě sol-gel s důrazem na zlepšení sledovaných parametrů v porovnání s ultra-nízko cementovým žárobetonem.

Klíčová slova

Žárobeton, sol-gel, koloidní silika

Abstract

This thesis deal with possible use of sol-gel method in refractory no-cement castables production. The most of commonly used castables are bonded by calcium aluminate cement. The main reason for replacing traditional hydraulic bond is to reduce calcium oxide content, which mainly causes formation of low melting phases during firing. In experimental part is designed fine matrix, which is sub-added by various types of refractory grogs. Colloidal SiO₂ as hydraulic bond replacement is used with commercially available gelling agent. Aim of this thesis is research of no-cement castable based on sol-gel method with emphasis on improving properties in comparison to ultra-low cement castable.

Key words

Castables, sol-gel, colloidal silica

1 ÚVOD

Podíl netvarových žárovzdorných výrobků se v posledních letech zvyšuje. Žárobetony mohou být klasifikovány různými způsoby. Ve vztahu k celkovému obsahu CaO je můžeme klasifikovat podle normy ASTM C401-12(2018), Standard Classification of Alumina and Alumina-Silicate Castable Refractories, do čtyř skupin: běžné cementové žárobetony RCC (> 2,5 % CaO), nízkocementové žárobetony LCC (1,0-2,5 % CaO), ultra-nízkocementové žárobetony ULCC (0,2-1,0 % CaO) a bezcementové žárobetony (do 0,2 % CaO). Hlinitanový cement (CAC) patří stále mezi nejpoužívanější pojiva, přičemž jeho obsah závisí na třídě žárobetonu (15-30 % RCC, 5-8 % LCC, 1-3 % ULCC). Smísením hlinitanového cementu s vodou dochází k tvorbě hydratačních produktů a vytvoření hydraulické vazby [1], [2]. Z hlediska chování v žáru, i malý obsah CaO vede k tvorbě nízkotavitelných fází CAS₂ a C₂AS, což vede ke snížení mechanických a žárových vlastností. Snížení obsahu oxidu hlinitého také vede k přednostní tvorbě mullitu 3Al₂O₃·2SiO₂, který má výborné mechanické i žárové vlastnosti. Možností, jak snížit obsah CaO, je využití alternativních vazeb – jako například metody sol-gel [3].

Mechanismus tuhnutí je pro metodu sol-gel rozdílný oproti žárobetonům spojeným hlinitanovým cementem a nazývá se gelace. Průběh gelace je ovlivněn změnou pH, velikostí a koncentrací křemičitých částic z koloidního roztoku SiO₂, přítomností elektrolytů a teplotou. Křemičitý koloidní roztok SiO₂ je používán kvůli možnosti tvorby mullitu v hlinitých systémech [4]. Částice koloidní siliky mají nejčastěji velikost mezi 30-50 nm.

Jsou schopny reagovat s částicemi Al_2O_3 , díky čemuž dochází ke zvyšování hutnosti při nižších teplotách. Výhody využití metody sol-gel jsou zejména rychlejší sušení, vyšší žárové parametry a odolnost proti teplotním šokům [2], [3], [4]. Naproti tomu tato metoda má i své negativní vlastnosti. Křemičité soly jsou citlivé k teplotám pod $5\text{ }^\circ\text{C}$, musí být tedy uchovávány v příznivých podmínkách. Tato metoda je také náchylná na nečistoty z použitých ostřív. Navíc ve velké míře nelze použít běžně používané plastifikační přísady, které se používají v žárobetonech na bázi hlinitanového cementu [5], [6]. Jedním z klíčových bodů systému sol-gel je obsah koloidní siliky jako pojiva a záměsové tekutiny. Standardní samotekoucí a vibrovatelné žárovzdorné betony potřebují velmi malé množství záměsové vody, obvykle do 10 procent, nejčastěji mezi 4 až 7 procenty [3], [7]. Snížením obsahu voda lze dosáhnout vyšší hutnosti a nižší pórovitosti výrobku. Touto metodou je také možné provádět tzv. opravy za horka (hot repairs), které nejsou u cementových žárobetonů možné kvůli hydrataci hlinitanových fází.

Cílem této práce je ověřit možnosti nahrazení hydraulické vazby metodou sol-gel v ultra-nízkocementovém žárobetonu. K dosažení vyšší hutnosti je také nutné navrhnout vhodnou křivku zrnitosti i s ohledem na obsah tekutin. Základní jemnozrná matrice se skládá z hrubého ostřiva (frakce 0,4-6,0 mm) a jemných částic (0-0,40 mm). V předkládané práci je použit navržený jemnozrný matrix, který vychází ze standardně vyráběných ultra-nízkocementových žárobeton. Vliv metody sol-gel na výsledné vlastnosti byl také posuzován v kombinaci s různými ostřív.

2 METODIKA

Základem je jemnozrný matrix založený na andalusitu, různých typech oxidu hlinitého a mikrosilice. V Tab. 1 je uvedeno složení základního matrixu.

Tab. 1 Základní matrix založený na jemných podílech.

Materiál	Obsah v matrixu [% hm.]
Andalusit 0-0,40 mm	20,2
Tabulární oxid hlinitý -325 mesh	18,9
Reaktivní monomodální oxid hlinitý 0,7-5,0 μm	16,1
Reaktivní bimodální oxid hlinitý 0,2-5,0 μm	13,8
Kalcinovaný oxid hlinitý 0,7-5,0 μm	14,5
Mikrosilika	16,5

Pro experiment byly použity čtyři typy hrubých frakcí ostřív s rozdílným obsahem Al_2O_3 – šamotové ostřivo (40 % Al_2O_3), vysocehlinité ostřivo (45 % Al_2O_3), andalusit (60 % Al_2O_3) a elektrotavený mullit (75 % Al_2O_3). Návrh receptur je prezentován v Tab. 2. Pro srovnání byla připravena receptura (ULCC-A), která obsahovala 2 % hlinitanového cementu. Receptury byly navrženy podle Andreasevova modelu distribuce částic s koeficientem $q=0,23$. V této experimentální práci nebyly použity žádné přísady. Použitá koloidní silika se vyznačuje velikostí částic $d_{50} = 15\text{ nm}$ s koncentrací pevných částic 30 %, pH 9,5 a stabilizací Na_2O . Jako gelační činidlo byl použit komerčně dostupný produkt.

Tab. 2 Navržené receptury založené na různých typech ostřív.

Složka/Receptura	NCC - A	NCC - HA	NCC - F	NCC - M	ULCC - A
Hrubé ostřivo	Andalusit	Vysocehlinité ostřivo	Šamotové ostřivo	Elektrotavený mullit	Andalusit
Obsah hrubého o.	78	78	78	78	78
Jemný matrix	22	22	22	22	22
Voda	2.5	6.0	3.4	2.6	5.5
Koloidní silika	5	5	5	5	(2 % CAC)
Tečení [%]	25	25	30	15	30
Tečení vibrační [%]	180	170	170	160	170

Připravené suché směsi byly za sucha homogenizovány po dobu 15 minut v laboratorní míchačce pro žárovzdorné hmoty HMZ-60f s excentricky umístěnou lopatkou vůči nádobě (otáčky lopatky 120 ot./min, otáčky nádoby 60 ot./min). Poté byla přidána voda a koloidní silika a následovalo mísení po dobu 10 minut.

Tečení (self-flow) a tečení vibrační (vibration-flow) bylo měřeno za použití kužele s výškou 50 mm podle ASTM C 1446-19. Připravené směsi byly odlity do forem s rozměry 40x40x160 mm a také 100x100x100 mm.

Vzorky byly odformovány po 24 hodinách. Vzorky byly poté sušeny v laboratorní sušárně při teplotě 105 °C. Všechny testované vzorky byly poté vypáleny v laboratorní elektrické peci na dvě různé teploty 1000 °C a 1500 °C (nárůst teploty 4 °C/min a doba výdrže na maximální teplotě 300 min).

Objemová hmotnost, nasákavost, zdánlivá pórovitost, pevnost v tlaku (CCS) a pevnost v tahu za ohybu (CMOR) byly stanoveny po vysušení i po výpalu. Zdánlivá pórovitost, nasákavost a objemová hmotnost byl stanoveny za použití vakuové metody podle normy ČSN EN 993-1:1995. Stanovení trvalých délkových změn v žáru bylo provedeno podle normy ČSN EN 993-10:1997. Únosnost v žáru byla stanovena dle ISO 1893:2007, teplotní dilatace byla stanovena podle ČSN EN 993-19:2004. Pevnost v tahu za ohybu byla provedena na zařízení Testometric M350-20CT podle normy ČSN EN 993-6:1995. Chemické složení bylo stanoveno podle ČSN EN ISO 21 587. Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) s EDX sondou (Tescan MIRA3) byla použita pro stanovení morfologie a k analýze krystalové struktury.

3 VÝSLEDKY A DISKUZE

Experimentální práce byly zaměřeny na použití koloidního SiO₂ v navržených bezcementových žárobetonech se základní jemnozrnnou maticí za použití různých druhů hrubých ostrív. V Tab. 3 je uvedeno výsledné chemické složení po výpalu. Receptury navržené jako bezcementové žárobetony s použitím koloidního SiO₂ jsou charakterizovány obsahem CaO nižším než 0,2 %. Podmínka normy ASTM C401-12 byla splněna a žárobetony lze klasifikovat jako bezcementové (NCC). Také receptura pojená hlinitanovým cementem splnila podmínku této normy pro ultra-nizko cementový žárobeton (obsah CaO nižší než 1,0 %).

Tab. 3 Chemické složení navržených receptur.

Receptura	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
NCC – A	33,05	65,49	0,11	0,68	0,08	0,12	0,11	0,15
NCC – HA	39,45	58,49	0,82	0,56	0,06	0,08	0,20	0,15
NCC – F	42,13	54,79	0,95	0,79	0,13	0,30	0,54	0,17
NCC – M	24,27	74,91	0,05	0,25	0,03	0,08	0,03	0,18
ULCC – A	32,32	65,45	0,16	0,88	0,79	0,04	0,01	0,13

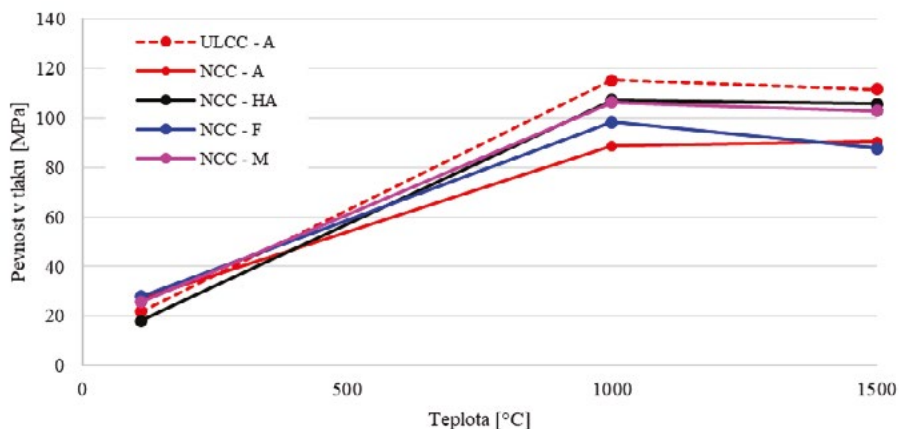
V následující Tab. 4 jsou uvedeny výsledky stanovených objemových hmotností, nasákavostí a zdánlivé pórovitosti po vysušení při 100 °C a po výpalu na 1000 °C a 1500 °C. Navíc jsou po výpalu stanoveny i trvalé délkové změny v žáru. Zvýšení teploty výpalu výrazně neovlivňuje zdánlivou pórovitost a nasákavost vzorků. Nejvyšší pokles je patrný u receptury NCC – F. Objemová hmotnost se mění v závislosti na použitém ostrívu. Čím vyšší je obsah oxidu hlinitého, tím vyšší objemová hmotnost je stanovena.

Tab. 4 Fyzikální parametry zkoušených receptur.

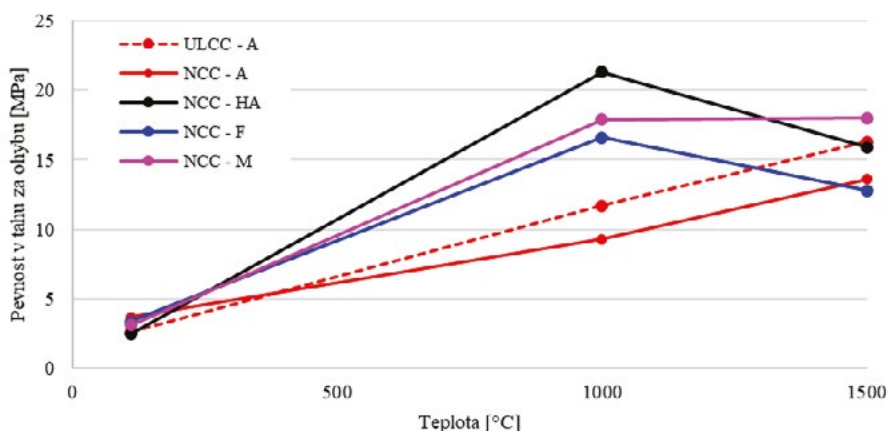
Receptura	Teplota výpalu [°C]	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Nasákavost [%]	Zdánlivá pórovitost [%]	Trvalé délkové změny [%]
NCC - A	110 °C	2730	5.5	15.0	-
	1000 °C	2715	5.6	15.2	0.00
	1500 °C	2630	5.4	14.2	1.16
NCC - HA	110 °C	2300	9.8	22.5	-
	1000 °C	2320	9.4	21.8	0.00
	1500 °C	2315	9.1	21.1	0.00
NCC - F	110 °C	2410	6.7	16.2	-
	1000 °C	2430	6.4	15.6	0.00
	1500 °C	2370	5.7	13.5	0.63
NCC - M	110 °C	2690	6.1	16.3	-
	1000 °C	2700	5.8	15.6	-0.52
	1500 °C	2700	5.7	15.2	-0.82
ULCC - A	110 °C	2740	5.3	14.5	-
	1000 °C	2700	5.8	15.7	0.10
	1500 °C	2640	5.5	14.4	0.83

Srovnání andalusitové bezcementové (NCC – A) a ultra-nízkocementové (ULCC – A) receptury nevykazuje významné odlišnosti ve smyslu fyzikálních vlastností. Trvalé délkové změny při 1500 °C jsou nižší v případě ULCC – A naproti NCC – A. Jelikož byl použit stejný jemnozrný matrix a stejné ostřivo (andalusit), je zřejmé, že použití metody sol-gel vede k vyššímu smrštění než v případě použití hlinitanového cementu.

Následující Obr. 1 a Obr. 2 reprezentují stanovené pevnosti v tlaku (Cold Crushing Strength) a pevnost v tahu (Cold Modulus of Rupture). Na základě výsledků můžeme pozorovat, že receptury na bázi sol-gel i po vysušení dosahují relativně stejných hodnot pevnosti v tlaku i tahu v porovnání s ultra-nízkocementovým žarobetonem. Rozdíly jsou patrnější až po výpalu na teploty 1000 °C a 1500 °C. U receptury ULCC – A bylo dosaženo lepších výsledků pevnosti v tlaku (CCS) než u čtyř bezcementových receptur. Při teplotě výpalu 1000 °C, receptury NCC – HA a NCC – M dosáhly téměř stejných výsledků, které jsou nižší o 7 % než u ULCC – A. Srovnání NCC – A a ULCC – A vykazuje relativně výrazné rozdíly. Při teplotě výpalu 1500 °C odpovídají výsledky trendu při teplotě výpalu 1000 °C, dochází však k mírnému poklesu pevnosti v tlaku.



Obr. 1 Pevnost v tlaku (Cold Crushing Strength) zkoušených receptur.

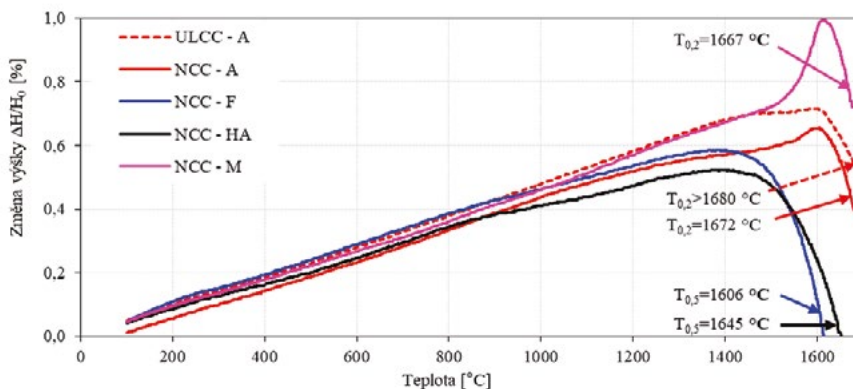


Obr. 2 Pevnost v tahu za ohybu (Cold Modulus of Rupture) zkoušených receptur.

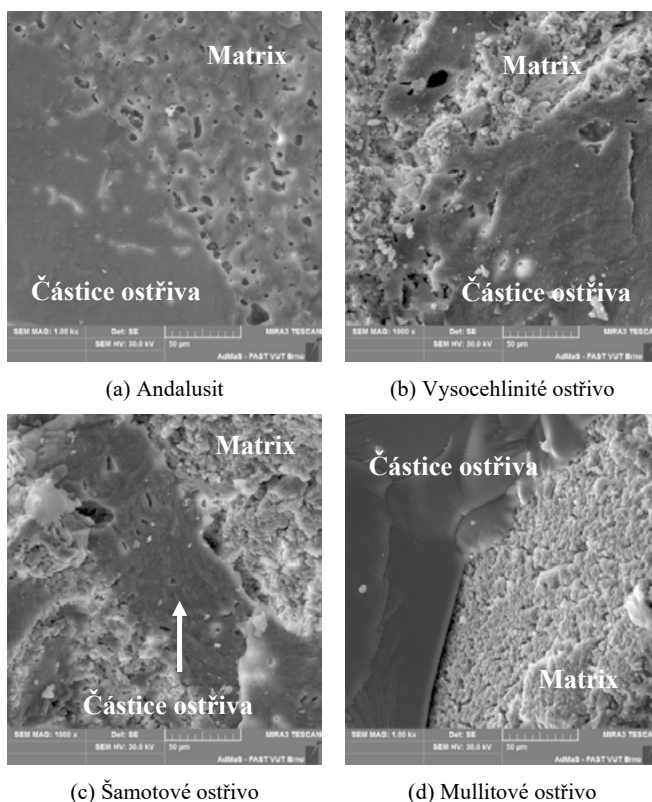
Výsledky pevností v tahu za ohybu (CMOR) po vysušení se pohybují v rozmezí od 2,5 do 3,7 MPa, přičemž nejnižší hodnoty je dosaženo u receptury NCC – HA a ULCC – A. Výpal na teplotu 1000 °C vede ke zvýšení pevnosti v tahu, výsledky odpovídají výsledkům pevnosti v tlaku kromě již zmíněných receptur NCC - HA a ULCC – A.

Vyšší teplota výpalu vede k mírnému ustálení hodnot okolo 15 MPa, přičemž nejnižších hodnot pevnosti v tahu dosahuje receptura NCC – F, která je založena na šamotovém ostrřivu.

Následující Obr. 3 zobrazuje stanovení únosnosti v žáru vypálených vzorků. Teplota při 0,5 % deformaci ($T_{0,5}$) nebyla stanovena pro ULCC – A, NCC – A and NCC – M, stanovena byla 0,2 % deformace ($T_{0,2}$). Změna vazby z hlinitanového cementu na sol-gel vede k mírnému zvýšení únosnosti v žáru. Teplota při 0,2 % deformaci ($T_{0,2}=1672\text{ }^{\circ}\text{C}$) byla stanovena pro ULCC – A, zatímco u receptury NCC – A vykazuje teplotu při 0,2 % deformaci vyšší než $1680\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 3 Únosnost v žáru zkoušených receptur.



Obr. 4 SEM analýza testovaných receptur NCC při zvětšení 1000x: a) andalusitový sol-gel NCC - A; b) vysocehlinitý sol-gel NCC - HA; c) šamotový sol-gel NCC - F, d) mullitový sol-gel NCC - M.

Z výsledků je patrné, že použité ostřivo má významný vliv na výslednou únosnost v žáru, s rostoucím obsahem Al_2O_3 dochází ke zvýšení únosnosti v žáru. Přítomnost mullitu v ostřivo také zvyšuje únosnost v žáru. Podobný průběh teplotních křivek je patrný do teploty $950\text{ }^\circ\text{C}$, nejvyšší teplotní roztažnost je změřena u NCC – M.

Mikrostruktura vypálených vzorků na teplotu $1500\text{ }^\circ\text{C}$ byla pozorována pomocí SEM jak je zobrazeno na Obr. 4. Zobrazeny jsou hranice zrn, přičemž je možné pozorovat rozdíly zejména v jejich pórovitosti a jejich napojení k matici. Snímky zobrazují vyšší obsah skelné fáze na Obr. 4a, kde je použito andalusitové ostřivo. Na druhou stranu je z ostatních snímků patrný vyšší obsah vyvinutých mullitových krystalů s nižším obsahem skelné fáze. Délka krystalů mullitu koreluje od 4 do $10\text{ }\mu\text{m}$ a tloušťka 0,5 do $1\text{ }\mu\text{m}$.

4 ZÁVĚR

Tento článek se zabývá zkoušením bezcementových žárobetonů založených na metodě sol-gel a poskytuje poměrně zajímavé výsledky. Bezcementové žárobetony mohou být vyráběny s dobrými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi v porovnání s ultra-nízkocementovými žárobetony, ze kterých vycházejí.

Experimenty vykazují srovnatelné výsledky zejména v pevnosti v tlaku. V případě pevnosti v tahu za ohybu je možné lepší hodnot dosáhnout záměnou hrubého andalusitového ostřiva za vysocehlinité ostřivo nebo mullitové ostřivo. Objemová hmotnost, nasákavost a zdánlivá pórovitost je také přímo ovlivněna hrubým ostřivem. Další výsledky, zejména únosnost v žáru, ukazují, že náhrada vazby z hlinitanového cementu za použití metody sol-gel je možná. Při srovnání vlivu použité vazby na výsledné vlastnosti není žádný takový výsledek, který by se významně odlišoval. Druh použitého ostřiva má také vliv na výsledné vlastnosti po výpalu nad $1500\text{ }^\circ\text{C}$ – zvyšování obsahu Al_2O_3 vede k vyšší únosnosti v žáru. Získané výsledky naznačují směr k dalším poznatkům v oblasti bezcementových žárobetonů.

Na základě výsledků bude výzkum probíhat se zaměřením na korozní odolnost, možnosti rychlého sušicího procesu a náběhu teplot při výpalu. Navíc, metoda sol-gel není použitelná pouze pro bezcementové žárobetony, uplatnění může nalézt i v torketech a shotkrettech, které jsou v kombinaci s robotizací další rychle se rozvíjející oblastí žárovzdorné keramiky.

Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory Interní Grantové Agentury Vysokého učení technického v Brně, projektu specifického výzkumu číslo FAST-J-20-6279 „Využití metody sol-gel při výrobě žárovzdorných betonů“.

Použité zdroje

- [1] S. Kannabiran and Z. Minghua, No Cement Castable - An Innovative Solution for Energy Saving from Höganäs Bjuf AB, in REFRA 2017, The Czech Ceramic Society.
- [2] M. Nouri-Khezrabad, M. A. L. Braulio, V.C. Pandolfelli, F. Golestani-Fard, H.R. Rezaie, Nano-bonded refractory castables, *Ceramics International*, 2013, Vol. 39, pp. 3479-3497.
- [3] L. Keršnerová, K. Lang, P. Kovář, L. Nevřivová, Improving the Properties of Refractory Materials by Sol-gel Method, in REFRA 2019, The Czech Ceramic Society.
- [4] C. Parr, T.A. Bier, N.E. Bunt, E. Spreafico, Calcium aluminate cement based castables for demanding applications, in 1st Monolithic conference, Iran, 1997.
- [5] H.E. Bergna and W.O. Roberts, *Colloidal Silica: fundamentals and applications*. CRC Press, 2005.
- [6] S.H. Badiiee and S. Otraj, Non-cement refractory castables containing nano-silica: Performance, microstructure, properties, in *Ceramics-Silikaty*. 2009, Vol. 53, pp. 297-302.
- [7] R. Sarkar and J. Srinivas, Effect of Cement and sol Combined Binders on High-Alumina Refractory Castables. *Refractories Worldforum*, 2016, Vol. 8, Göller Verlag GmbH, pp. 73-78.
- [8] J. Neese, B. Kesselheim, S. Rollmann, S. Scheffler, HYBRID – Advance for Sol-Gel Bonded Refractory Concrete, *Refractories Worldforum*, 2019, Vol. 4, Göller Verlag GmbH, pp. 37-43.

7.

Management stavebnictví

Structural Economics and Management

INSPECTION ACTIVITIES VIA UAV TECHNOLOGY

Zbyněk Škoda^{*,1}

*zbynek.skoda@fsv.cvut.cz

¹CTU in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Construction Management and Economics, Thakurova 7, Prague, 166 29, Czech Republic

Abstract

Labor productivity in construction has stagnated for many years and innovation has been implemented very slowly. Today, the construction industry is facing a digital transformation. The purpose is to reduce the cost of the entire project life cycle and improve information sharing capabilities. In some cases, digital technologies show us advantages from the initial conceptual design to the final stage of construction. By using these technologies properly, we can reduce the cost of the entire life cycle of a structure. One of these relatively young technologies is UAV (Unmanned Aerial Vehicles). They are models of aircraft that are able to fly without a pilot and passengers on board. The drones are therefore controlled remotely by radio waves or autonomously according to a prescribed route.

Key words

UAV, photogrammetry, drones, inspection

1 INTRODUCTION TO UAV AND PHOTOGRAMMETRY

The first mention of the UAV dates back to the end of the First World War, specifically to 1918. The very first unmanned machine capable of independent flight was created at the request of the US Army under the name "Kettering Bug". This ingenious predecessor of drones was not used in the action; however, it gave rise to a new industry that had a great future ahead. Inventor Charles is behind the creation of the Kettering Bug. F. Kattering, who collaborated with O. Wright, the inventor of the world's first functional aircraft.

For most of the time, development has focused on risk-free research. Due to the long stay in the air and the acquisition of quality photographic material in real time. At the beginning of the 21st century, however, development shifted to application in direct combat. Drones at that time were mainly developed for military use. In the past, the development of UAV systems and platforms was primarily mediated for military purposes. Unmanned control, surveillance, reconnaissance and mapping of enemy areas were the primary military targets.

However, today the use of drones is widespread in the civilian sphere and is experiencing a huge boom around the world. It currently serves many purposes. Their recent significant expansion has brought a number of ideas for use. However, as the public became more aware, it had to bring new legislative rules.



Fig. 1 Current user drones for use in photogrammetry [1].

According to the Civil Aviation Authority (CAA), an unmanned aircraft is defined as an aircraft intended for operation without a pilot on board. An unmanned system is then defined as a system consisting of an unmanned aircraft, a control station and any other element necessary to enable flight, such as control-command data links and a launch and return element. The data captured by the drone can provide desirable information with critical accuracy for construction planning or for creating the actual documentation that is used to digitally survey the

object. The purpose of drones in construction is usually to create a cloud of points of geometric shapes from the surface of the building, which allows you to improve design processes, reduce errors in data collection, save time and money. Such a survey yields a digital data file that essentially contains a dense cloud of points, where each point is represented by a coordinate in 3D space. All these points are placed in the same coordinate system and this system then forms an area, a building, an object and all this in 3D space.

With the advent of digital cameras, photogrammetry has entered a new era. Photogrammetry (sometimes also SFM - Structure from Motion) is a science that deals with measurements from photographs. The field of photogrammetry is almost as old as the field of photography itself. In this field of science, information on objects is obtained on the basis of accurate measurements in a contactless manner. The word photogrammetry consists of the words fotos - light, gramma - record and metry - measurement and was first used in 1858 by the German engineer Albrecht Meydenbauer. Over the last 50 years, the concept of photogrammetry has changed so much that it is a completely different discipline than it used to be. This is due to the great development of computers. At the end of the last century, analogue methods, and later analytical methods, ceased to be used, thanks to the advent of completely digital methods. These new methods meant major technological changes in the transition to 3D documentation of space and object.

Despite the considerable advancement of these technologies, there are still certain limitations that affect the quality of the resulting 3D model in the form of a point cloud. Although current technologies can quickly and reliably create large point clouds, inaccuracies can occur. Many buildings contain areas that the scanner cannot target. In such situations, the resulting model may be inaccurate because the point cloud does not contain all the spatial information. UAV photogrammetry really opens up new possibilities, thanks to a low-cost alternative to classic manned aerial photogrammetry for extensive and detailed 3D ground information recording.

2 INSPECTION ACTIVITIES

The possibilities of use for small drones have multiplied in the last decade. Small size, maneuverability, low cost and universal use have given the opportunity to excel UAV in many other disciplines. One of them is the inspection of bridges. Drones are perceived positively in these applications, as it is possible to perform inspections in a very safe and also cost-effective manner and therefore far exceed the benefits of conventional inspection methods.

Unmanned vehicles are increasingly recognized as equipment for inspection procedures in construction. In order to create a measurable benefit over traditional inspection methods, UAV inspections need to be integrated into existing processes and their use automated. It is mainly about setting up processes within structured planning, simulation flights and subsequent inspection flights. There are already software that can automatically plan the flight and then transfer all the data to the 3D environment. These systems can automatically generate a collision-free flight plan using pre-supplied data.

While autonomous navigation in agriculture, where open agricultural land (fields) is used, is reliable and accurate, in construction, the GPS signal can often be lost and the inspection route plan can be devalued. Therefore, it is necessary to pay increased attention to the environment where the inspection using drones is applied, so as not to degrade the obtained data due to signal loss and localization of the obtained points.



Fig. 2 Open air inspection using GPS signal [3].

3 INSPECTION OF BRIDGE STRUCTURES

Effective monitoring strategies play a major role in achieving the target service life of construction, especially for bridge structures. The main part of bridge inspections is based on visual examination methods. Inspection of critical components and locations that are difficult to access is technically complex and usually requires specially trained personnel along with heavy machinery, high-lift platforms and other special equipment. Here, remote-controlled drones equipped with a camera with sufficient resolution can greatly simplify these control tasks.

More than ten percent of national bridges are currently rated as structurally deficient and dangerous. However, financial constraints hampered inspection activities, resulting in bridges not being inspected to the same extent required by legislation. The cost of inspecting a bridge varies depending on the size, type, and location of the bridge. For many bridges, an articulated inspection vehicle (Snooper) can be used for inspection, which is used to maneuver under the bridge for visual inspection of the substructure. For bridges where this vehicle cannot be used, inspection teams may use scaffolding and climbing harnesses. Even for small bridges, inspections may require scaffolding or ladder systems. However, the result is that the inspection of one bridge can take several days, depending on the construction of the scaffolding. In addition, it is often mandatory to partially or completely shut down bridge traffic during such bridge inspections.

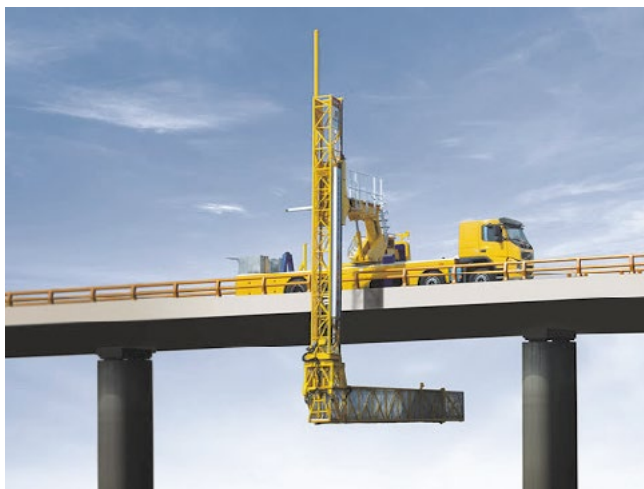


Fig. 3 Bridge inspection unit for diagnostics of bridge structures [7].

An alternative to traditional inspection techniques can therefore be the use of unmanned systems. Unmanned aircraft can be used in the areas of survey, geodetic and mapping procedures or scanning using photogrammetry. The benefits of UAS have already been explored in agriculture, where thermal, multispectral and hyperspectral data from crop fields were collected using remote sensors. Data from flight instruments were compared with crop data collected from the ground to provide data on vegetation health. Small drones have also appeared in the field of surveying, especially in geodesy and photogrammetry. Unmanned aerial vehicles are also used to inspect buildings and facades, which are often difficult to monitor. Last but not least, UAVs are used for bridge inspection. However, the applicability for bridge inspections is still debated among experts. High variability of bridge geometry, surface objects (barriers, railings) and variations in the environment creating an extremely difficult scenario for inspections. Bridge inspections require that it be possible to examine even small and dark areas under the bridge structure, and this is a major complication for the UAV for the time being. Theoretically, inspections can be carried out autonomously; however, many years remain to be used in practice.

In the Czech Republic, according to data from the Czech Statistical Office from 2020, on motorways and roads I to III. classes a total of 17,580 bridges. There are usually no bridges on local and special-purpose roads in the register of bridge structures. Bridges, which can be classified as unsatisfactory, are growing very fast. ŘSD, individual regional authorities and the Road Maintenance Administration are not enough to renew bridges. One of the primary reasons is the lack of funds and skilled builders.

It follows from the above situation that there will be considerable demand for monitoring and inspections of bridge structures in the coming years. The existing capacities of the domestic construction sector are not able to satisfy this growth in demand. The solution may be to automate the inspection of bridge structures and reduce their financial costs using unmanned aircraft, as well as data collection methods using photogrammetry.

4 CONCLUSION AND DISCUSSION

The use of drones in combination with software for photogrammetry has great potential in the field of construction projects, construction of infrastructure and in inspection activities. It is advantageous to use these new technologies where it is necessary to provide accurate, processed and specific data from the outdoor environment quickly. However, even in the world, the use of UAV systems is still in its infancy. However, we can state that it pays to use drones for larger and larger projects or inaccessible places. In the case of larger areas of construction sites, the created model can be an invaluable helper in monitoring the progress of construction sites or compliance with fire and safety and health and safety procedures, in order to save time.

The author would also like to create a comprehensive study on the defined problem and design a methodology for the flight mission of data collection using photogrammetry with subsequent transfer of data to a virtual environment. In this work, the author will further evaluate the accuracy of data and the possibility of using UAV for inspection purposes in construction. The work will also deal with the legislative issues of unmanned aerial vehicles. Part of the solution will be the practical use of photogrammetric measurement on a specific object with subsequent evaluation of results and comparison of advantages and disadvantages of creating 3D models based on photogrammetric measurement in construction.

Acknowledgement details

This work was supported by the Grant Agency of the Czech Technical University in Prague, grant No. SGS20/018/OHK1/1T/11.

References

- [1] Commercial Drone Industry Trends. DroneDeploy blog [online], 2018, 30.5.2018 [accessed 2020-07-25]. Available online at: https://blog.dronedeploy.com/2018-commercial-drone-industry-trends-70b83e0a2e6f?fbclid=IwAR3Tuvd_2dtEpo1IZaFduZj80bGz7MIZh_GysUyEHEvByM8NkqfSVz_UJM Citace 2
- [2] Macdonald, Chyenenne. The drone that will CHASE thieves: Security UAV. Dailymail. [Online]14.12.2015. [Accessed 27th June 2020.]. Available online at: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3359624/Drones-CHASE-thieves-Security-UAV-follow-invaders-make-sure-camera.html>
- [3] Factors Affecting Accuracy in Photogrammetry. PhotoModeler [online]. -: PhotoModeler technologies, 2018 [accessed 2020-08-18]. Available online at: https://www.photomodeler.com/kb/factors_affecting_accuracy_in_photogramm/
- [4] Corrigan F Introduction to UAV photogrammetry and Lidar mapping basics, Available online at: <https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/introduction-to-uav-photogrammetry-andlidar-mapping-basics/>
- [5] Colomina I, Blázquez M, Molina P, Parés M.E, Wis M (2008) Towards a new paradigm for high-resolution low-cost photogrammetry and remote sensing. *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, China, 37 (B1): 1201-1206.
- [6] Motawa, I. and Kardakou, A. (2018). Unmanned aerial vehicles (UAVs) for inspection in construction and building industry. The 16th International Operation & Maintenance Conference.
- [7] AsphaltPlantChina.com. Bridge Inspection Vehicle (platform Type) [Online] 2019. [accessed 30. 06 2020.]. Available online at: <http://asphaltplantchina.com/4-6-1-bridge-inspection-vehicle/>
- [8] PixPro. PixPro Technology. Photogrammetry with the smartphone [Online] 2018. [accessed 28. 06 2020.]. Available online at: <https://www.pix-pro.com/photogrammetry-with-the-smartphone/>

FINANČNÍ NÁROČNOST MUNICIPALITY PRO PŘÍPAD VÝSTAVBY NA ZELENÉ LOUCE

FINANCIAL INTENSITY OF THE MUNICIPALITY IN THE CASE OF CONSTRUCTION ON A GREENFIELD

Matěj Buňat^{*,1}

*matej.bunat@fsv.cvut.cz

¹ ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra ekonomiky a řízení ve stavebnictví, Thákurova 2077/7, Praha 6, 160 00, Česká republika

Abstrakt

Brownfieldy představují značnou příležitost pro možnosti výstavby. V rešerši je rozlišení tohoto pojmu pro Evropu a Severní Ameriku, včetně definice autora. Situace nákladů a případné návratnosti stavebních projektů ze strany investora bývá jednoduchá. V přípravné fázi lze vypracovat studii proveditelnosti. Kde náklady lze stanovit formou propočtu a následnou simulací očekávaných příjmů stanovit návratnost projektu. Každý stavební projekt přináší zátěž nepřímo i na veřejný rozpočet. Stanovení finanční náročnosti pro municipalitu v závislosti na budoucí developerský projekt se odvíjí od situace v rámci městského inženýrství. Pro tento případ je výsledkem příspěvku ověřit funkčnost aplikace pro stanovení těchto pořizovacích nákladů.

Klíčová slova

Brownfield, municipalita, náklady, finance

Abstract

Brownfields represent a significant opportunity for investors for construction opportunities. The research explains the distinction between this term for Europe and America, including the definition of the author. The return on investment is usually simple for the investor, usually solved by means of a feasibility study. The costs are determined in the form of a calculation. The return is determined by the subsequent simulation of expected revenues. Every construction project brings a financial burden on the public budget. The determination of the financial demands for the municipality depending on the situation within the framework of urban engineering. For this case, the result of the paper is to verify the functionality of the application for determining these acquisition costs.

Key words

Brownfield, municipality, costs, finance

1 ÚVOD

Problematic brownfieldů je v České republice věnována pozornost od konce devadesátých let, s dvacetiletým odstupem od vyspělých zemí světa. Na úvod je potřeba podotknout, že pozornost společnosti se postupně stále ve větší míře upíná k problematice brownfieldů, jejich inventarizaci, kategorizaci apod. Zatímco oblast urbanistické ekonomie je v posledních letech spíše upozaděna. Vysvětlením pojmu brownfield se v dnešní době zabývá mnoho institucí i samotných autorů. V České republice proto neexistuje jednotná definice, která by byla stanovená zákonem.

Vedení obce by mělo zvážit budoucí ekonomické dopady na obecní rozpočet z hlediska bilancí příjmů a výdajů. Rozloha a přihlášený počet obyvatel ovlivňuje výdaje, ale i příjmy obcí. Každá nová výstavba ze strany soukromého investora může znamenat zásah do veřejného rozpočtu. Z tohoto důvodu je výstupem práce model finanční náročnosti, který lze využít v rámci municipalit ke stanovení předpokládaných nákladů, které budou hrazeny z veřejných rozpočtů.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

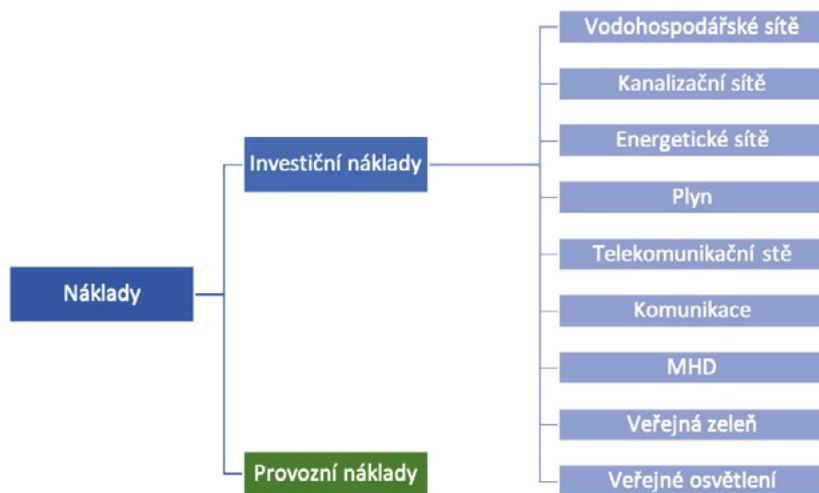
Při hledání platné definice pojmu brownfield v zahraničí lze nalézt nesourodost a rozdílnosti mezi vnímáním problematiky [1]. Největší konkrétní rozdíl je mezi Anglií a Spojenými státy americkými. Obě země se snaží své lokality snižovat již od 70. let 20. století, zejména pro účely jejich politik udržitelného rozvoje. Hlavní rozdílem je, že se USA zaměřuje na kontaminaci a UK se zajímá hlavně na množství nevyužitých dřívě rozvinutých pozemků a kontaminaci jako takovou nereflektují. U autorů ze Spojených států amerických [2, 3] se lze často setkat s tím, že se úvahy zaměřují na kontaminaci lokalit a autoři se snaží vyčísřit náklady na její obnovu. Pomocí toho došel autor [4] k poznatku, že v porovnání s novostavbou na zelené louce se zkrátí přepravní časy v rámci města. Pomocí toho také dochází autor [5] k výsledku snižování skleníkových plynů. Někteří autoři se zaměřují na vyčíslení času, resp. rychlosti regenerace brownfieldů [6].

Tento urbanistický pojem pochází z anglického jazyka a v doslovném překladu znamená „hnědá pole“. Nic konkrétního by nám ale nenaznačil, a proto se v České republice nepoužívá [7]. Ministerstvo pro místní rozvoj (dále jen „MMR“) používá jako substitut „deprimující zóny“. Další ministerstvo, a to Ministerstvo životního prostředí (dále jen „MŽP“), užívá jako ekvivalent za brownfield „narušené pozemky“ [8]. S problematikou souvisejí další dva pojmy, Greenfield a Blackfield. Greenfield je úplným opakem Brownfield. Blackfieldy jsou oblasti, které mají vysokou kontaminaci půdy nebo také podzemních či povrchových vod. Ke znečištění vedla např. těžba a následné zpracování nerostných surovin, ale také skladování nebezpečných odpadů [8].

Pro účely příspěvku je využita definice vytvořená autorem. „Pojem brownfield se rozumí nemovitost, jakožto prostor, který je v současnosti částečně nebo plně nevyužitý a velmi často nějakým způsobem poškozený a je možná kontaminace. Nemovitost byla v minulosti využívána v rámci urbanizovaného území či volné krajiny a ztratila svou původní funkci a v současnosti degraduje ekonomicky či fyzicky sebe či své okolí. Nelze ji vhodně a efektivně využívat, aniž by proběhl proces její regenerace.“ [1].

3 METODIKA

Posouzení finanční náročnosti je nezbytné ve všech základních odvětvích městského inženýrství (MI), které jsou pro výpočet rozděleny do 9 oblastí nákladů (Obr. 1).



Obr. 1 Strom kritérií (oblastí) pro algoritmus, inspirováno programem PREV [10].

Byl vytvořen MS Excel s výpočtem pořizovacích nákladů. Po zadání vstupních hodnot, specifikací plánované infrastruktury a zadání očekávané vzdálenosti nové infrastruktury jsou stanoveny předběžné náklady výstavby městské infrastruktury.

Veškeré uvažované odvětví městského inženýrství je vypočteno na měrnou jednotku (*metry*), vyjma zavedení městské hromadné dopravy a případné výstavby nové trafostanice. Z toho vyplývá, že hlavním parametrem pro novou výstavbu bude vzdálenost od současných veřejných sítí k těm novým.

Cenová databáze pro výpočet byla vytvořena pomocí stavebních standardů za rok 2018 RTS Brno a.s. [11], nabídek společností Vakomobiliar [11], Zahradní design Monika Buňatová, Dopravní podnik Praha a Kooperativa, výrobně obchodní družstvo.

Vzhledem k doporučení 10% možné odchylky od kalkulovaných nákladů pomocí stavebních standardů, je uvažována také 10% směrodatná odchylka. U ostatních odvětví využívajících nabídku je uvažováno s 15% odchylkou, kvůli větší konkurenci a možnosti vytvoření odlišných kalkulací (nabídek) od jiných subjektů. Zároveň není uvažováno s možným rabatem.

Položky určující parametry jednotlivých odvětví městského inženýrství pro výpočet jsou určující tabulkou vstupních hodnot, které jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obr. 2):

Obr. 2 Formulář na stanovení parametrů pro obecný postup výpočtu.

Pro každý parametr (i) je určen náklad na její výstavbu, dle zadané vzdálenosti výstavby městského inženýrství (d) a specifikací daného parametru (s), viz. formulář zobrazeného na Obr. 2. Pro výpočet je vytvořena datová základna na měrnou jednotku jednotlivého parametru (C), neboli cenová soustava. Výpočet deterministické varianty je následně využit formou vzorce:

$$i = d_i * C_i * s_i \quad (1)$$

kde:

d_i = vzdálenost prodloužení městského inženýrství (m)

C_i = cenová základna na d_i

s_i = specifikace, upravující měrnou jednotku C_i v závislosti na d_i

4 VÝSLEDKY

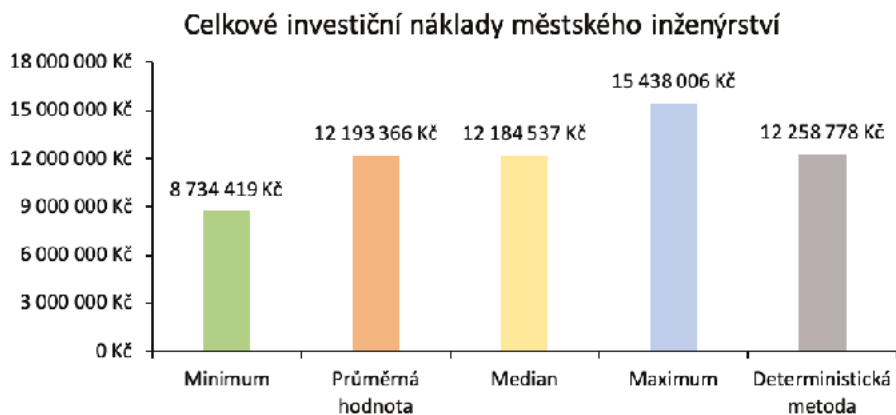
Pro ověření funkčnosti modelu byl využit projekt výstavby bytového domu na lokalitě, která je vzdálena 1 000 metrů od současné městské infrastruktury. Pro každé odvětví zvlášť je následně vypracováno 100 možných simulací, které jsou vytvořeny na základě náhodných čísel, generovaných v rozsahu stanovené hodnoty za jednotlivé odvětví, plus minus směrodatná odchylka.

Pomocí výpočtu každého odvětví zvlášť je zpracován výpočet s využitím propočtu, ve kterém jsou uvažovány položky: Základní rozpočtové náklady (ZRN), vedlejší rozpočtové náklady (VRN), projektové a průzkumné práce a rezerva. ZRN jsou vypočteny pomocí výše uvedeného postupu, ostatní položky propočtu jsou stanoveny jako procentuální sazby ze ZRN, kde VRN je uvažováno jako 2 %, projektové a průzkumné práce mají procentní parametr stanoven na 9 % a rezerva je stanovena na 4 %. Ostatní položky nejsou v projektu výstavby uvažovány a lze je uvažovat nulové.

Vzhledem k možným simulacím je zpracována tabulka (Tab. 1) a z ní vycházející graf (Obr. 3) celkových nákladů s variantami minimálních, maximálních, středních, průměrných hodnot ze simulací. Pro porovnání výsledků jsou zobrazeny také hodnoty deterministického přístupu.

Tab. 1 Náklady na městské inženýrství, při stochastickém i deterministickém hledisku.

	Celková hodnota ZRN	Rezerva	Projektové a průzkumné práce	VRN	Celkové investiční náklady
Minimum	8 212 127 Kč	328 485 Kč	29 564 Kč	164 243 Kč	8 734 419 Kč
Průměrná hodnota	11 464 241 Kč	458 570 Kč	41 271 Kč	229 285 Kč	12 193 366 Kč
Median	11 455 940 Kč	458 238 Kč	41 241 Kč	229 119 Kč	12 184 537 Kč
Maximum	14 514 861 Kč	580 594 Kč	52 253 Kč	290 297 Kč	15 438 006 Kč
Deterministická metoda	11 525 741 Kč	461 030 Kč	41 493 Kč	230 515 Kč	12 258 778 Kč



Obr. 3 Statistické náklady na MI, při stochastickém i deterministickém hledisku.

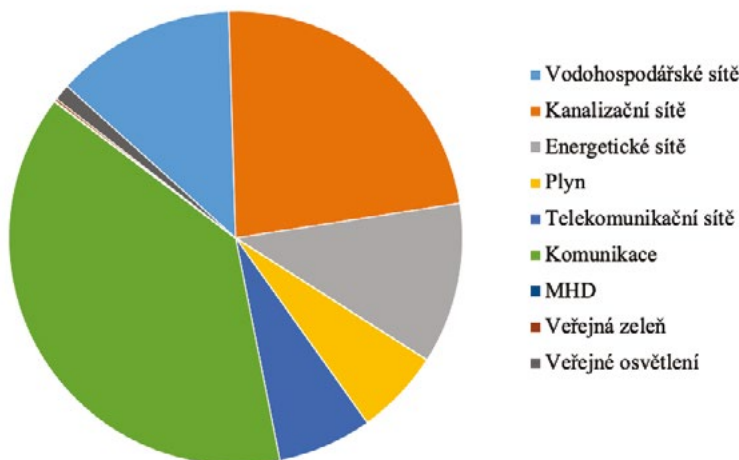
5 DISKUZE

Městští urbanisté a architekti musí ve spolupráci se stavebními odbory akceptovat dopady nové výstavby a vyvíjet tlak na investory, aby více využívali územní celky typu brownfield. Vědecký přínos tohoto rozkladu je obecným návodem pro rozhodování a k jeho naplnění nelze pohlížet jen z pohledu nákladů. Je nezbytné zohledňovat celkové koncepce města, jeho intravilán, architektonické hodnoty okolních staveb a řady dalších faktorů.

Rozhodně je nezbytné každé posouzení využití brownfieldu posoudit moderními rozhodovacími metodami, jako jsou např. brainstorming, bodovací metody či metoda bazické varianty.

Samozřejmě každá obec či město se snaží zvyšovat počty obyvatel, z důvodu budoucího městského rozpočtu. Ale zvyšování za každou cenu nebo neefektivní může naopak vést k ještě větším finančním nákladům a ve výsledku na tom ještě daná obec či město doplatí. Tím, že je město nutné obstarat napojení na veřejné sítě, zajistit komunikaci do nové výstavby apod. vynakládá část městského rozpočtu právě na tyto úlohy. Pokud bude využívat zastavování nevyužívaných ploch uvnitř obce nebo se bude snažit rozšiřovat obec lokalizovaným způsobem, nikoli skokově bude mít náklady na výstavby i údržby nižší.

Vzhledem k stanovení výsledné náročnosti nákladů jednotlivých položek, specifikovaných dle Obr. 1, lze uvažovat důležitost jednotlivých odvětví tak, jak je uvedeno na následujícím ilustračním grafu (Obr. 4). Z něj jednoznačně vyplývá, že největším nákladem bývá výstavba komunikací.



Obr. 4 Navýšení ceny u odvětví městského inženýrství. Cenová náročnost jednotlivých odvětví MI, dle specifikace uvedených výše.

6 ZÁVĚR

V současnosti lze využívat velmi rozmanitý počet variant pro umístování staveb, a to v celé České republice. Výstupem bylo určit náročnost městského rozpočtu pro výstavbu na zelené louce z pohledu municipality. Obce se zatím tolik nezabývají problematikou městského inženýrství a možností snížení nákladů právě využitím lokalit brownfield. Většina obcí si ani nevede kategorizaci svých brownfieldů a nemůže tyto územní celky nabídnout potenciálním investorům. Tím, že navíc není veřejně dostupná aktuální databáze nalezených lokalit brownfield zabraňuje možnost jejich revitalizace a tím se vytváří menší eventualitu využívání ploch. Nyní lze využívat řadu možností pro rozhodovací proces. V příspěvku byla popsána aplikace pro výpočet investičních nákladů v případě prodloužení městské infrastruktury, kterou lze využít v případě rozhodování výběru z variant. Funkčnost aplikace byla ověřena na příkladu výstavbového projektu. Jedním z uvažovaných kritérií rozhodovacího procesu může být výsledek z aplikace výpočtu finanční náročnosti výstavby pro veřejný sektor. Vzhledem k uvažování životního cyklu stavby, lze na aplikaci pokračovat zejména pro případ provozní či likvidační fáze, aby měl veřejný sektor větší možnost představy o nákladech z plánované výstavby.

Na problematiku brownfield a městského inženýrství je potřeba upozornit. Zároveň poukázat na skutečnost, že je možné lépe využívat urbanistické přístupy v obcích. V budoucnu by měla být snaha o zajištění snižování počtu brownfield v rámci celé České republiky.

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS20/013/OHK1/1T/11.

Použité zdroje

- [1] BUŇAT, M. Definice Brownfield v rámci České republiky. In: Udržitelnost, inovace a ekonomika ve stavebnictví 2018. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra ekonomiky a řízení ve stavebnictví, 2018. ISBN 978-80-01-06519-8.
- [2] ALBERINI, A., A. LONGO, S. TONIN, F. TROMBETTA a M. TURVANI. The role of liability, regulation and economic incentives in brownfield remediation and redevelopment: evidence from surveys of developers. *Regional Science and Urban Economics*. 2005, 35(4), 327-351. ISSN 01660462. Dostupné z: doi:10.1016/j.regsciurbeco.2004.05.004
- [3] RITHIE, A. a R. THOMAS. *Sustainable urban design: an environmental approach*. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2009. ISBN 9780415447829.
- [4] AMEKUDZI, A. a I. FOMUNUNG. Integrating Brownfields Redevelopment with Transportation Planning. *Journal of Urban Planning and Development*. 2004, 130(4), 204-212. ISSN 0733-9488. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)0733-9488(2004)130:4(204)
- [5] ELLERBUSCH, F. Brownfields: Risk, property, and community value. *Local Environment*. 2006, 11(5), 559-575. ISSN 1354-9839. Dostupné z: doi:10.1080/13549830600853486
- [6] DIXON, Timothy J. *Sustainable brownfield regeneration: liveable places from problem spaces*. Malden, MA: Blackwell, 2007. ISBN 978-1405144032+.
- [7] Brownfields příručka. In: *Brownfields příručka* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: https://fast10.vsb.cz/lepob/index2/handbook_cz_screen.pdf
- [8] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Národní strategie regenerace brownfieldů*. Praha, 2008. Dostupné také z: <http://www.czechinvest.org/data/files/strategie-regenerace-vlada-1079.pdf>
- [9] ADAMS, D. a C. WATKINS. *Greenfields, brownfields, and housing development*. Oxford: Blackwell Science, 2002. Real estate issues (Oxford, England). ISBN 978-063-2063- 871.
- [10] DLASK, P. a V. BERAN. *Software pro hodnocení projektů: PREV v. 2.0, Mosaic* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011 [cit. 2017-11-26]. ISBN 978-80-01-04880-1.
- [11] *Stavební standardy* [online]. RTS, 2016 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <http://www.stavebnistandardy.cz/>
- [12] *Vakomobiliar* [online]. 2020 [cit. 2020-09-30]. Dostupné z: https://www.vakomobiliar.cz/?gclid=Cj0KCQiAzZL-BRDnARIsAPCJs72BriU_pbSbyP1ogri0BXu119IVTr8PUEBVZaU3zEcMpm3HOMPqaLcaAuxcEA Lw_wcB
- [13] *Kooperativa, výrobně obchodní družstvo* [online]. 2019 [cit. 2020-09]. Dostupné z: <http://www.kooperativa-vod.cz>

ANALÝZA PŘÍRŮSTKU ZAMĚSTNANCŮ A OBYVATEL Z PODLAŽNÍCH PLOCH VELKÝCH DEVELOPERSKÝCH PROJEKTŮ

ANALYSIS OF INCREMENTAL CAPACITIES OF JOBS AND RESIDENTS FROM FLOOR AREAS OF BIG DEVELOPMENT PROJECTS

Svatopluk Pelcák^{*,1}

*Pelcaks@gmail.com

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 60200 Brno

Abstrakt

Cílem článku je popsat podlahové plochy projektů dle účelu užití a naznačit souvislost mezi nimi a výslednými počty zaměstnanců, nebo obyvatel pro daný projekt. Ty jsou důležité pro další práci s projekty, například pro ohodnocení přínosů projektu pro dané město, či městskou část. Pro potřeby výzkumu byl sestaven výčet největších developerských projektů ve 2 největších městech ČR, Praze a Brnu. Význam těchto projektů je enormní, protože se na území těchto zmíněných měst nachází velké množství brownfieldů, a to ve velmi pro město významných lokalitách. Tyto brownfieldy jsou právě často ideální příležitostí pro městský rozvoj takovým směrem, který město právě potřebuje. Článek zapadá do mozaiky výzkumu socio-ekonomických dopadů developerských projektů.

Abstract

The aim of the research is to describe the floor areas of projects according to the purpose of their use and to indicate the relationship between them and the resulting incremental capacities of jobs, and residents. These are important for further work with projects, for example for evaluating of benefits of the project for a given city or city district. For the needs of the research, a list of the largest development projects in the 2 largest cities in the Czech Republic, Prague and Brno was compiled. The importance of these projects is enormous, because there are a large number of brownfields in the territory of these mentioned cities, in very important localities for the city. These brownfields are often the ideal opportunity for urban development in the direction the city needs.

Klíčová slova

Socio-ekonomické dopady, Přírůstek kapacity rezidentů, přírůstek pracovních míst.

Key words

Socio-economic impacts, Incremental capacity of residents, Incremental capacity of jobs.

1 ÚVOD

Článek je zaměřen na užší úsek problematiky hodnocení socio-ekonomických dopadů developerských projektů. Pro účely tohoto výzkumu byly vybrány pouze developerské projekty toho největšího rozsahu - to znamená projekty rozvíjející oblast bloku, či celou městskou část.

Developerské projekty jsou jednou z mála zásadních příležitostí efektivně měnit vzhled a funkčnost města, které jsou v dnešní době dostupné. Zejména důležité jsou potom v těch největších českých městech s rozsáhlou architektonickou minulostí. V těchto městech je často velmi omezená možnost realizovat rozsahově větší výstavbu, a to zejména kvůli řadě regulativů, které výstavbu omezují. Takovými regulativy jsou kupříkladu platný územní plán, nebo památkové zóny. Potřeby města, které lze shrnout jako potřeby jeho obyvatel, se ale v čase relativně často mění. A takovými změnám musí odpovídat a současná výstavba. Problémem ale je, že v historicky významných částech měst je jen velmi málo ploch vhodných k nové výstavbě, která by tuto změnu mohla přinášet. Jedinou příležitostí pro takové změny jsou poté brownfieldy, na které se téměř všechny tyto developerské projekty většího rozsahu zaměřují.

V situaci, kdy se ale jedná o takto zásadní projekty pro rozvoj města, je nutné aby město jasně specifikovalo, co je tím, co samo město - jeho občané - potřebují. Proto se tato práce zabývá hlubším výzkumem dopadů

developerských projektů. Přesněji zkoumá souvislosti navrhovaných hrubých podlahových ploch pro jednotlivé typy objektů. A to tak aby výsledkem byl přehled toho kolik u daných projektů na měrnou jednotku vzniká jednotek výstupů jednotlivých dopadů. V tomto případě jsou zkoumanými dopady vznik pracovního místa a vznik místa pro obyvatele.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED

V současné době se jako základní dokument pro plánování projektů rozsahu uvedeného v tomto článku používají zejména územní studie. Územní studie obsahují základní předpoklad využití území spolu se základními výpočty kapacit technického vybavení oblasti. To vše za účelem prověření podmínek změn území[1]. V rámci územních studií se zpracovává tzv. kapacitní bilance území, jež určuje základní kapacity právě přírůstků obyvatel, pracovníků apod. Tyto kapacity vychází z celé řady pravidel, ale finální hodnoty jsou vždy podřízeny konkrétnímu návrhu a to na základě odborného vedení urbanistů a územních plánovačů. Příkladně musí splňovat podmínky na množství plochy pro bydlení - u budov pro bydlení minimálně 60 %[2]. V případě pracovních míst, je zase udáno normativem minimální plocha pro 1 pracovní místo[3]. Výslednou plochu ale odborně určí vždy urbanista, jež bere v potaz jak potřeby dané lokality, tak odbornou zkušenost.

3 METODIKA

Základní kámen výzkumu tvoří struktura CBA analýzy, což je analýza určená na zjištění efektivnosti veřejných investic. Tato struktura je postavená na hodnocení tzv. socio-ekonomických dopadů projektu. To jsou takové dopady, jež nemají primárně finanční dopady, ale jsou spíše sociálního charakteru. Tyto dopady se ale projeví do finančních toků beneficentů v sekundárních a dalších rovinách. Proto je součástí článku výzkum právě dvou takových typických dopadů developerských projektů, přírůstků obyvatel a pracovních míst. Článek je postaven na předchozím výzkumu jež se zabýval definicí a popisem socio-ekonomických dopadů projektů. Cílem je v tomto článku zjistit, zdali lze při pohledu na celkový projekt sledovat nějaký trend v poměru účelu plochy ku jednotce výstupu tohoto druhu plochy.

4 VÝSLEDKY

V rámci výzkumu byla vytvořena databáze šesti největších developerských projektů dvou největších měst ČR – v Praze a Brně. Vybrány byly projekty, jež jsou svou velikostí opravdu velmi významné pro rozvoj města. Zároveň byly vybrány projekty, jejichž realizace se zakládá na zpracované územní studii. To proto aby byla dostupná daná data o hrubých podlahových plochách pro toto srovnání. Následující tabulka shrnuje vybrané projekty včetně základních atribut.

Tab. 1 Soupis projektů.

n	Název projektu	Zamýšlený charakter území	Rozloha [ha]
1	Smíchov City	Kompletní blok městské zástavby	20
2	Holešovice Bubny-Zátory	Městská čtvrť s kompletní obč. vybaveností	110
3	Zbrojovka	Městská čtvrť s kompletní obč. vybaveností	22
4	Vlněna	Administrativní	3,3
5	Kamenný vrch	Rezidenční	12
6	Na kaménkách	Rezidenční se základní občanskou vyb.	27

V tabulce lze vidět účely jednotlivých projektů a také jejich rozlohy. Z vybraných projektů jednoznačně vyčnívá projekt 2 – Holešovice z Prahy, jež svou rozlohou pojme všechny ostatní projekty. Tento projekt má také nejlépe zpracovanou územní studii včetně dílčích kapacit jak obyvatel, zaměstnanců, ale také dopravních kapacit, vybavení technické infrastruktury a mnoho dalších. Je žádoucí využívat tento projekt jako vzorový.

Přírůstek míst pro bydlení

V rámci sekce bydlení bylo relevantní pouze 5 projektu ze 6 vybraných. A to proto, že projekt Vlněna ve městě Brně je čistě administrativního charakteru, a tak přírůstek obyvatel je v daném projektu nulový. Následující tabulka č.1 shrnuje zjištění o navrhovaných místech pro bydlení v těchto projektech.

Tab. 2 Přírůstek pracovních míst v jednotlivých developerských projektech.

Místa pro bydlení						
n	Praha	Rozloha [ha]	HPP pro bydlení	Počet obyvatel	Ob/HPP	počet m ² pro 1 obyvatele
1	Smíchov City	20	52 682	3 300	0,063	16,0
2	Holešovice Bubny-Zátory	110	1 001 887	24 117	0,024	41,5
3	Zbrojovka	22	211 279	6 037	0,029	35,0
4	Vlněna	3,3	0	0	0	0,0
5	Kamenný vrch	12	107 691	2 500	0,023	43,1
6	Na kaménkách	27	197 287	4 351	0,022	45,3

Na základě zjištěných dat je vidět, že souvislost mezi jednotlivými návrhy jsou minimální. Je zde podobnost návrhových podlahových ploch na obyvatele u projektů 2,5 a 6. Kde u projektů 5 a 6 se jedná o projekty výhradně rezidenčního charakteru v okrajových částech města. Zatímco u projektu 2 jde o projekt přestavby celé městské čtvrti. Větší návrhová plocha na jednoho obyvatele pak značí, že projekt počítá s tím, že nebude tak hustě obydlen jak jiné projekty. Relativně blízko k plochám na obyvatele je Brněnský projekt Nové Zbrojovky, jež počítá s cca 35 m² na obyvatele. Což není tak kritický rozdíl jako u projektu 1 – Smíchov city, jež počítá pouze s 16 m² na obyvatele. Což je s ohledem na velikosti bytových jednotek téměř až nereálná hodnota. Pokud ale tuto hodnotu vyloučíme z výčtu projektů pohybují se všechny hodnoty kolem 41 m²/obyvatele.

Přírůstek pracovních míst

Při analýze přírůstku pracovních míst byly uvažovány zejména 3 zdroje pracovních míst - administrativní pracovní místa, pracovní místa v odvětví obchodu a služeb a pracovní místa ve stavbách veřejné vybavenosti – školy, kultura, sport. Na základě těchto zjištění byla sestavena následující tabulka č. 2.

Tab. 3 Přírůstek pracovních míst v jednotlivých developerských projektech.

n	Praha	Rozloha [ha]	HPP pracovních míst	Pracovních míst	poměr PM/HPP	počet m ² pro 1 zaměstnance
1	Smíchov City	20	32514	9000	0,277	3,6
2	Holešovice Bubny-Zátory	110	733395	28857	0,039	25,4
3	Zbrojovka	22	196505	9025	0,046	21,8
4	Vlněna	3,3	70614	6200	0,088	11,4
5	Kamenný vrch	12	1128	23	0,020	49,0
6	Na kaménkách	27	59999	2597	0,043	23,1

V rámci výzkumu pracovních míst se nejbližší hodnoty vyskytují u projektů 2,3 a 6. Kde toto je způsobeno podobným poměrem mezi jednotlivými typy pracovních míst. Tento efekt lze vidět zejména u projektu 5 kde v projektu Kamenný vrch jsou všechna pracovní místa v oblasti obchodu a služeb, jež jsou charakteristické poměrně velkým poměrem podlažní plochy na 1 pracovní místo. Což je dané zejména tím, že velká část plochy je využívána právě pro prodej zboží. Opakem tohoto jsou pak administrativní budovy, jež využívají drtivou většinou prostoru právě pro jednotlivé pracovníky – viz. Projekt 4 Vlněna, jehož přírůstek pracovních míst je z drtivé většiny v administrativních pracovních pozicích. Jako anomálii lze označit opět projekt Smíchov city, z jehož Hrubých podlahových ploch vychází průměr na 1 pracovní místo 3,6 m². Jednotlivé rozdělení ploch dle jednotlivých kategorií pracovních míst je rozděleno v tabulce č. 3.

Tab. 4 Rozdělení hrubých podlahových ploch podle charakteru pracovních míst.

n	Praha	HPP Administrativní	HPP Služby a obchod	HPP Veřejná vybavenost	Počet m ² pro 1 zaměstnanec
1	Smíchov City	24161	8353	0	3,6
2	Holešovice Bubny-Zátory	483617	155858	93920	25,4
3	Zbrojovka	114738	75967	5800	21,8
4	Vlněna	69609	1005	0	11,4
5	Kamenný vrch	0	1128	0	49,0
6	Na kaménkách	26754	31889	1356	23,1

5 DÍZKUZE A ZÁVĚR

Na základě doposud realizovaného výzkumu v kontextu tohoto článku byla vytvořena koncepce postupu při hodnocení přínosů developerských projektů. A to zejména z pohledu jeho socio-ekonomických dopadů. Nejdůležitějším zdrojem dat pro takový výzkum je urbanistická územní studie, jež popisuje budoucí oblast pomocí kapacit a požadavků na to co by v dané oblasti mělo vzniknout. Těmi klíčovými kapacitami těchto studií jsou právě přírůstky pracovních míst a míst pro bydlení. V rámci výzkumu bylo vybráno 6 největších projektů ve 2 největších městech a byly analyzovány přírůstky právě těchto pracovních míst a míst pro bydlení. Na základě dat bylo zjištěno, že při předpokladu vyváženého návrhu hrubých podlažních ploch pro bydlení se pohybuje průměrná hodnota na 1 místo pro bydlení cca 41m²/1 místo pro bydlení.

Při pohledu na pracovní místa je tento závěr složitější protože pracujeme s různými druhy pracovních míst, které mají úplně jiné prostorové nároky na jedno pracovní místo. S podobnými poměry jednotlivých druhů pracovních míst pracovali 3 projekty a u těchto se pohyboval průměr pracovních míst kolem 23m².

Poděkování

Tento článek byl zpracován v rámci projektu specifického výzkumu Vysokého učení technického FAST-J-20-6348 Analýza socio-ekonomických dopadů developerských projektů.

Použité zdroje

- [1] Metodický pokyn MMR - Územní studie[online]. Copyright © [cit. 29.11.2020]. Dostupné z: https://mmr.cz/getmedia/f653ecc5-e6e8-4825-b36d-374042a4b167/UzemniStudie_17122010.pdf
- [2] Příloha č. 1 obecně závazné vyhlášky statutárního města Brna č. 2/2004 1. strana z 28
- [3] Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci
- [4] Liu, Guiwen & Yi, Zhi Yong & Zhang, Xiaoling & Shrestha, Asheem & Martek, Igor & Wei, Lizhen. (2017). An Evaluation of Urban Renewal Policies of Shenzhen, China. Sustainability. 9. 1001. 10.3390/su9061001.

VPLYV VEREJNÉHO PROJEKTU REVITALIZÁCIE BROWNFIELDU NA ROZVOJ ZAMESTNANOSTI

IMPACT ON EMPLOYMENT DEVELOPMENT UNDER THE INFLUENCE OF PUBLIC PROJECT ORIENTED ON BROWNFIELD REVITALIZATION

Jakub Sabo^{*,1}

*jakub.sabo93@gmail.com/158012@vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Článek sa zaoberá vplyvom revitalizácie brownfieldu ako verejného projektu na rozvoj zamestnanosti v regióne. Zakladá sa na prípadovej štúdii verejného projektu revitalizácie brownfieldu lom Most - Ležáky. Je to starý opustený lom, ktorý bol napustený vodou a vznikla rekreačná oblasť jazero Most. Je predpoklad vzniku infraštruktúry a teda aj zariadenia ponúkajúce rôzne služby. Najčastejšie sú to ubytovacie zariadenia, reštaurácie atď. Podľa odhadovanej návštevnosti je možné vypočítať približný počet vzniknutých zariadení a teda aj približný počet novo-vzniknutých pracovných miest. Tie sa dajú považovať za benefit revitalizácie a na základe ich predpokladaného počtu je mu potom možné pomocou nástroju eCBA priradiť socio-ekonomickú hodnotu, ktorá môže byť využitá v prípadnej CBA analýze.

Klíčovú slova

Brownfield, revitalizácia, verejný projekt, rozvoj zamestnanosti, jazero Most

Abstract

The paper is focused on the impact of brownfield revitalization as a public project on the development of employment. It is based on a case study of a public brownfield revitalization project in the Most - Ležáky quarry. It is an old abandoned quarry, which was filled with water to create a recreational area Lake Most. The creation of infrastructure and thus also facilities offering various services is a precondition. According to the estimated attendance, it is possible to calculate the approximate number of created facilities and the approximate number of newly created jobs. It can be considered as benefit of revitalization and based on their expected number, it is then possible to assign the socio-economic value of the benefit using the eCBA tool, which can be used in a CBA analysis.

Key words

Brownfield, revitalisation, public project, employment development, lake Most

1 ÚVOD

Brownfieldy sú často problémom rozvoja obcí vzhľadom na ich negatíva ako zložitú majetko-právnu vzťahy, prevažne zdevastované budovy a v neposlednom rade často ekologickú záťaž, spôsobenú toxickými látkami používanými počas ich prevádzky, ktoré kontaminovali podzemné a povrchové vody a aj okolie [1]. Často sú využívané ako nepovolené nelegálne skládky odpadu a na mnohých z nich boli kedysi kumulované a uložené nebezpečné odpady, ktoré tam zostali dodnes [3]. Vzhľadom na tieto okolnosti býva okolie brownfieldov často zdraviu škodlivé, a tým pádom sa tento problém javí ako ešte horší [7].

Je v záujme širokej verejnosti takéto brownfieldy revitalizovať a znovu ich začať využívať. Spolu s touto revitalizáciou je možné dosiahnuť množstvo benefitov [2].

Vplyv na rozvoj zamestnanosti v regióne revitalizáciou daného brownfieldu môže slúžiť ako príklad benefitu, ktorý by mohol byť využitý na CBA analýzu nielen tejto, ale aj iných podobných revitalizácií. Výsledné hodnoty sa aj za pomoci investora zakladajú a odvodzujú z predpokladaných hodnôt návštevnosti, ktoré vychádzajú z návštevnosti podobných miest ako jazero Most. Takéto miesto je napríklad jazero Milada vzdialené len niekoľko desiatok kilometrov. Z týchto hodnôt vieme približne určiť počet ubytovacích zariadení, reštaurácií, stánkov, obchodov a iných [4].

Na základe vyčíslenia novo-vzniknutých pracovných miest dokážeme pomocou nástroja eCBA priradiť tomuto benefitu socio-ekonomickú hodnotu, čo vie byť využité v CBA analýze a môže teda slúžiť ako príklad možného benefitu pre ďalšie podobné revitalizácie.

2 LITERÁRNÝ PREHLAD/POPIS SÚČASNÉHO STAVU

Prac a literatúr na tému brownfield a jeho revitalizácii existuje viacero, keďže téma je v dnešnej dobe veľmi populárna. Sám som sa tejto téme venoval v mojej bakalárskej aj diplomovej práci a napísal som na ňu už niekoľko článkov. Základné teoretické informácie vychádzajú z knihy Boženy Kadeřábkovéj a Mariana Piechy v knihe s názvom "Brownfields - jak vznikají a co s nimi." V tejto knihe je možné nájsť teoretické informácie o vzniku a rozdelení brownfieldov, ako aj možnosti vysporiadania sa s nimi [1]. Ďalšie teoretické informácie môžeme nájsť v knihe "Současné formy užívání industriálních historických objektů" od Martiny Peřinkovéj [2]. Informácie potvrdzujúce, že revitalizácia brownfieldov prináša rozvoj zamestnanosti prináša aj kniha s názvom Průručka pro regeneraci brownfieldov BROWNTRANS. Táto kniha bola vydaná za podpory projektu "Brownfield Regeneration Know-How Transfer" a skúma dopady brownfieldov ako aj ich revitalizácie. Okrem iného poukazuje aj na to, že pokles zamestnanosti je priamy dopad brownfieldov a ich revitalizovanie zase prináša opak, teda zvýšenie zamestnanosti [8]. Ďalšia akademická štúdia s názvom "Analýza překážek v zhodnocování nevyužívaných a zanedbaných území v intraviláne miest a návrh podporných opatření" hovorí o tom, že nevyužívané a zanedbané územia často ovplyvňujú aj svoje širšie okolie a to okrem iného aj zvýšenou nezamestnanosťou a väčšou kriminalitou [9]. Články vychádzajúce k týmto témam sú napríklad "Economic evaluation of the brownfields revitalisation". Článok sa zaoberá rovnako ako tento revitalizáciou brownfieldu lomu Most - Ležáky a konkrétne vyčíslením socio-ekonomickej hodnoty zmeny biotopu [5]. Ako je už vyššie uvedené, výsledok tohoto článku bol uverejnený aj v diplomovej práci autora s názvom "Ekonomické hodnocení veřejného projektu zameřeného na revitalizaci brownfieldu"[6].

3 METODIKA

Revitalizovaním oblasti a vybudovaním infraštruktúry dáva priestor investorom a podnikateľom na realizáciu podnikateľských plánov a teda aj vznik nových pracovných miest napríklad v ubytovacích zariadeniach, reštauráciách, stánkoch, obchodoch atď. Výpočet benefitu bude prevedený pomocou aplikácie eCBA podľa počtu nových pracovných miest za obdobie jedného roku.

Na výpočet približného počtu novo-vzniknutých miest bol prevedený výpočet približného počtu ubytovacích zariadení podľa počtu predpokladaných ročných prespaní. Tento údaj vychádza z údajov navýšenia prespaní po sprístupnení neďalekého jazera Milada, ktorých zdrojom je Český Štatistický Úrad. Detailný metodický postup bude teda vyzeráť asi takto:

- Kontrola zvýšenia ročného počtu prespaní podobného projektu v roku otvorenia v porovnaní s predchádzajúcimi rokmi (podľa ČSÚ)
- Využitie rovnice na prepočet prespaní a návštev rezidentov a nerezidentov
- Znásobenie celkového počtu návštev a prespaní koeficientom (vychádza z veľkosti projektu a kvality infraštruktúry, ako aj z dát podobne veľkých projektov v zahraničí)
- Opačný prepočet získaného počtu návštev a prespaní predchádzajúcou rovnicou
- Na základe počtu prespaní vypočítané priemerné denné prespania počas hlavnej sezóny
- Na základe priemerného množstva lôžok v ubytovacích zariadeniach (ČSÚ) prepočítaný potrebný počet nových ubytovacích zariadení na daný denný priemer prespaní a prepočítané na novo-vzniknuté pracovné miesta
- Na základe priemerných denných návštev odhadnuté počty ostatných zariadení ako reštaurácie, obchody, stánky, požičovne apod. a prepočítané na novo-vzniknuté pracovné miesta
- Sčítané novo-vzniknuté pracovné miesta
- Priradená socio-ekonomická hodnota novo-vzniknutým pracovným miestam pomocou eCBA a teda vyčíslená finálna hodnota benefitu

Rozvoj zamestnanosti v regióne sa teda bude odvíjať na základe predpokladanej návštevnosti rekreačného strediska. Na základe kapacity priemerného ubytovacieho zariadenia je možné potom vypočítať potrebný počet ubytovacích zariadení a na základe toho zase počet potrebných pracovných miest. Z údajov návštevnosti vieme odhadnúť aj počet ostatných zariadení ako obchody, stánky a reštaurácie. Po sčítaní všetkých pracovných miest vieme vypočítať socio-ekonomickú hodnotu tohto benefitu pomocou eCBA.

4 VÝSLEDKY

Neďaleké jazero Milada navštevuje ročne odhadovane 50 000 ľudí. Odhad vznikol na základe údajov z Českého Štatistického Úradu a to skokovým zvýšením prespaní v roku otvorenia jazera Milada v okolitých mestách Teplice a Ústí nad Labem, oproti predchádzajúcim rokom (viď Tab. 1).

Tab. 1 Celkové približné zvýšenie návštevnosti kvôli jazero Milada.

Údaj	Výsledok
Približné zvýšenie prespaní	22 104
Pomer nerezidentov	41,10 %
Celkový počet prespávajúcich nerezidentov	9086
Celkový počet prespávajúcich rezidentov	13 018
Počet neprespávajúcich rezidentov	26 036
Celkový približný počet návštevníkov	48 140

Celkové zvýšenie počtu prespaní je 22 104. Keďže Český Štatistický Úrad poskytuje aj informácie o tom, či prespal rezident alebo nerezident, je možné vypočítať celkovú priemernú hodnotu prespaní nerezidentov z oboch miest. Táto hodnota je 41,1 % prespaní nerezidentov. Tým pádom takmer polovicu prespaní tvoria turisti zo zahraničia. Ďalej je možné predpokladať, že zahraničný turista prespáva vždy, pretože ak príde na rekreáciu do inej krajiny, aby pre neho bola cesta zo zahraničia efektívna, pobudne veľmi pravdepodobne viac ako jeden deň a je teda nútený prespať. Niečo iné bude pravdepodobne platiť pri prespaní rezidentov. Budeme predpokladať, že k jednému prespávajúcemu rezidentovi, ďalší dvaja navštívia miesto bez prespania. Tým pádom je možné vytvoriť odhadovaný celkový počet návštevníkov jazera Milada za rok, čo je ako je vyššie spomenuté, takmer 50 000 ľudí.

Keďže jazero Milada je rozlohou menšie a má slabšie vybudovanú infraštruktúru ako sa predpokladá pri jazere Most, návštevnosť jazera Most sa predpokladá dvojnásobná, a teda 100 000 návštevníkov ročne, tak ako pri podobných jazeroch v neďalekom Sasku. Keďže máme odhadované množstvo 100 000 návštevníkov za rok, predchádzajúcu rovnicu je možné použiť opačným spôsobom aj na budúcich návštevníkov jazera Most.

Tab. 2 Predpokladaný výpočet rozloženia typu návštevníkov jazera Most.

Údaj	Výsledok
Predpoklad návštev	100 000
Predpokladaný pomer prespávajúcich rezidentov a nerezidentov	50 %
Prespávajúci rezidenti	x
Neprespávajúci rezidenti	2x
Prespávajúci nerezidenti	x
Neprespávajúci nerezidenti	0
Výsledná rovnica	$100\ 000 = x + 2x + x + 0$
Výsledné "x"	25 000
Prespávajúci rezidenti	25 000
Neprespávajúci rezidenti	50 000
Prespávajúci nerezidenti	25 000
Neprespávajúci nerezidenti	0

Podľa rovnice nám teda vychádza odhad 25 000 prespávajúcich domácich návštevníkov, 50 000 neprespávajúcich domácich návštevníkov a 25 000 prespávajúcich zahraničných návštevníkov, pričom s neprespávajúcimi zahraničnými návštevníkmi sa nepočíta.

Tab. 3 Výpočet približného počtu hromadných ubytovacích zariadení (HUZ).

Údaj	Výsledok
Priemerne lôžok v HUZ podľa	44
Celkový počet prespaní ročne	50 000
Počet prespaní pri jazere cez hlavnú sezónu	25 000
Počet dní hlavnej sezóny (Jún-September, 4x30 dní)	120
Počet prespaní na deň v hlavnej sezóne	208,3333
Počet potrebných ubytovacích zariadení	4,734848
Približný počet vybudovaných HUZ podľa výpočtu	5

Podľa Českého Štatistického Úradu je počet lôžok na prespanie v Mosteckom okrese 1586 a počet hromadných ubytovacích zariadení 36. Priemerný počet lôžok na ubytovacie zariadenie je teda 44. Celkový počet prespaní ročne bol predchádzajúcim výpočtom (viď Tab. 2) stanovený na 50 000. Nedá sa predpokladať, že všetky tieto prespania budú v novo-vybudovaných ubytovacích zariadeniach a iba počas hlavnej sezóny, teda v rozmedzí mesiacov jún a september. S predpokladom, že približne polovica prespaní bude v iných ubytovacích zariadeniach, prípadne nie počas hlavnej sezóny, bolo vypočítané (viď Tab. 3), že približný počet potrebných novo-vybudovaných ubytovacích zariadení v revitalizovanej oblasti je 5. Predpokladaný počet zamestnancov na jedno zariadenie počas hlavnej sezóny je 7. Mimo hlavnej sezóny, teda na zvyšných 8 mesiacov, je predpokladaný počet zamestnancov na zariadenie 4. Keďže výpočet benefítu počíta s celoročným vytvorením pracovných miest, bol priemerovaný počet podľa počtu zamestnancov a počtu mesiacov na 5 zamestnancov na ubytovacie zariadenie. Podľa Tab. 3 je približný počet ubytovacích zariadení 5. Tým pádom počet novo-vytvorených pracovných miest v ubytovacích zariadeniach je 25. Z predpokladaných 100 000 návštevníkov ročne bude odhadovaných 75 000 návštev počas hlavnej sezóny, čo je jún až september, kvôli povahe revitalizovanej oblasti, čo vychádza priemerne niečo okolo 600 návštev denne. Keďže môžeme predpokladať, že návštevnosť nebude takto veľká celý rok, nebolo by efektívne ani pre podnikateľov tieto počty v plnej miere kapacitne dosiahnuť. Z toho je odhadované že v oblasti vzniknú 2 nové reštaurácie o kapacite 150 ľudí po 6 zamestnancov a 3 stravovacie stánky po jednom zamestnancovi, teda celkovo 15 pracovných miest. Je odhadované vytvorenie 3 pracovných pozícií pre požičovne a 7 zamestnancov obchodov alebo stánkov so suvenírmi.

Tab. 4 Výpočet približného počtu ubytovacích zariadení.

Typ zariadenia	Počet vzniknutých miest
Ubytovacie zariadenia	25
Reštaurácie	12
Iné stravovacie zariadenia	3
Požičovne	3
Obchody/stánky	7
Pracovných miest celkom	50

Celkový počet nových vzniknutých pracovných miest je teda približne 50 (viď Tab. 4). Tieto miesta sa dajú pomocou aplikácie eCBA prepočítať na socio-ekonomickú hodnotu a priradiť do prípadnej CBA analýzy ako benefít.

Tab. 5 Výpočet dopadu vytvorenia nových pracovných miest podľa eCBA

Počet miest	Hodnota za jedno miesto za rok	Celková hodnota za rok
50	11 435,72 €	571 786,2 €

Podľa hodnoty z tohoto nástroja je socio-ekonomická hodnota jedného novo-vytvoreného pracovného miesta približne 11 435 € a celková hodnota benefítu teda približne 571 786 € (viď Tab. 5).

5 DISKUSIA

Tento benefit tvorí socio-ekonomická hodnota takmer 600 000 €, čo môžeme porovnať s benefitom zmeny biotopu revitalizáciou identického brownfieldu z článku "Economic evaluation of the brownfields revitalisation" ktorá tvorí socio-ekonomickú hodnotu cca 61 000 000 €. Oproti tomuto sa môže zdať benefit rozvoju zamestnanosti ako minoritný, ale je nutné si uvedomiť, že spomínaný benefit zmeny biotopu je benefit jedno-rázový, zatiaľ čo hodnota benefitu rozvoju zamestnanosti sa rozprestiera v čase jedného roka, a bude sa každý rok opakovať a je pravdepodobné, že aj zvyšovať.

6 ZÁVER

Výsledok benefitu môže v značnej miere ovplyvniť CBA analýzu a môže byť rozdielový pri otázke efektivity revitalizácie daného brownfieldu. Metodiku tvorby benefitu je možné použiť aj pri iných brownfieldoch, ak sú podmienky kompatibilné. Je potreba si ale uvedomiť, že počet novo-vytvorených pracovných miest je len odhadovaný, takže sa môže líšiť s reálnymi hodnotami. Tento odhad vychádza z odhadovaného počtu návštev, ktorý bol dosiahnutý na základe porovnaní s inými podobnými projektami a ich veľkosťou. Pre zlepšenie schopnosti odhadovať počet novo-vytvorených miest by bolo ideálne zistiť reálny stav po určitom časovom období a porovnať ho s odhadom. Tento krok by mohol lepšie ukázať výslednú reliabilitu tejto metodiky.

Podakovanie

Tento článok bol uverejnený za podpory špecifického výskumu Vysokého učení technického v Brne Fakulty pod názvom FAST-J-20-6428 Postup ekonomického hodnocení revitalizace brownfieldů.

Použité zdroje

- [1] Kadeřábková B. & Piecha M. Brownfields, how do they arise and what to do with them. 1st edition. Prague: C. H. BECK, 2009, ISBN 978-80-7400-123-9
- [2] Peřínková, Martina. Současné formy užívání industriálních historických objektů. Ostrava ; Praha: Gasset; Techné Ostrava, 2012. ISBN 978-80-87079-25-6.
- [3] Atkinson G., Doick K.J., Burningham K. & France C. Brownfield regeneration to greenspace: Delivery of project objectives for social and environmental gain. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2014, 13(3), 586-594 [1]
- [4] Jirásek F. Lake Most - supraregional project - summary of the state to 20. 12. 2017. Accompanying report.
- [5] Hromádka, Vít, Eva Vítková a Jakub Sabo. Economic evaluation of the brownfield revitalisation. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. 2018, (VOLUME 18), 8.
- [6] SABO, Jakub. Ekonomické hodnocení veřejného projektu zameraného na revitalizaci brownfieldu. Brno, 2018. Vysoké učení technické v Brne Fakulta stavební. Vedoucí práce Vít Hromádka.
- [7] Regenerace brownfields. PLANETA. 2007, XV(3), 21.
- [8] PETRÍKOVÁ, Dagmar a Barbara VOJVODÍKOVÁ. Příručka pre regeneráciu brownfieldov BROWNTRANS [online]. ROAD Bratislava, 2013, , 265 [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: http://fast10.vsb.cz/browntrans/document/Brownfields_handbook_Slovak%20version.pdf
- [9] FINKA, Maroš, , Dagmar PETRÍKOVÁ a Lubomír JAMEČNÝ. Analýza prekážok v zhodnocovaní nevyužívaných a zanedbaných území v intraviláne miest a návrh podporných opatrení [online]. In: . Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2019, s. 68 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://www.mindop.sk/ministerstvo-1/mestsky-rozvoj-6/mestsky-rozvoj/studie/analyza-prekazok-v-zhodnocovaní-nevyuzívaných-a-zanedbaných-území-v-intraviláne-miest-a-navrh-podporných-opatrení>

MODELOVANIE ZMIEN POZDĹŽNEJ NEROVNOSTI ASFALTOVEJ VOZOVKY

MODELLING OF CHANGES IN THE LONGITUDINAL UNEVENNESS OF THE ASPHALT ROAD

Michaela Ďurinová*¹, Ján Mikolaj¹

*michaela.durinova@uniza.sk

¹Zilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26

Abstrakt

Modelovanie zmien parametrov prevádzkovej spôsobilosti možno považovať za jeden zo súčasných problémov v riešení otázok systému hospodárenia s vozovkami. Z dôvodu zhoršujúceho sa stavu cestnej siete sa pristúpilo k modelovaniu zmien parametrov prevádzkovej spôsobilosti a ekonomickému zhodnoteniu vplyvov ich vývoja na výslednú efektívnosť opravy, resp. rekonštrukcie vozovky, prostredníctvom národného výpočtového programu ISEH. V článku sa pozornosť zameriava na parameter pozdĺžnej nerovnosti, avšak v rámci tohto výskumu sa zameriava pozornosť aj na parameter priečnej nerovnosti, drsnosti a stavu porušenia krytu. Cieľom výskumu je vytvorenie podkladu pre následnú analýzu citlivosti na zmeny parametrov prevádzkovej spôsobilosti a určenia optimálneho roku opravy.

Kľúčové slová

Efektívnosť, pozdĺžna nerovnosť, modelovanie, prínosy, vozovka

Abstract

Modelling of changes in pavement serviceability can be considered as one of the current problems in solving the questions of the pavement management system. Due to the deteriorating condition of the road network, modelling of changes in the parameters of pavement serviceability and economic evaluation was started. The influence of the development of parameters on the final efficiency of the correction by the national calculation program ISEH is monitored. The article focuses on the parameter of longitudinal unevenness, but attention is also focused on the parameter of transverse unevenness, roughness and the state of failure of the cover. The aim of the research is to create a basis for the subsequent analysis of sensitivity to changes in the parameter of pavement serviceability and to determine the optimal year of repair.

Key words

Efficiency, longitudinal unevenness, classification, modelling, benefits, pavement

1 ÚVOD

V súčasnosti je potrebné sústrediť pozornosť na kvalitu a vynakladanie finančných prostriedkov potrebných na vybudovanie nových úsekov ciest, ale najmä opravu a rekonštrukciu existujúcich vozoviek. Optimalizovanie a efektívne využitie finančných prostriedkov správcov komunikácií je nutné vzhľadom na situáciu, kedy sa každoročne vynakladá na opravu a údržbu vozoviek milióny Eur. Alokácia jednotlivých finančných prostriedkov na opravu vozoviek by mala byť založená na modelovaní hodnotenia efektívnosti variantných riešení projektov. Modelovanie zmien parametra prevádzkovej spôsobilosti sa zameriava na sledovanie vplyvu konkrétneho parametra na výsledné ukazovatele ekonomickej efektívnosti.

Cieľom výskumu je porovnanie vplyvu parametrov prevádzkovej spôsobilosti na výslednú ekonomickú efektívnosť projektu metódou CBA, ale aj na priebeh prínosov a zníženie externých nákladov. Spomenutá metóda slúži ako spôsob stanovenia najefektívnejšej varianty opravy [1]. V minulosti bol výskum venovaný iba vytvoreniu a porovnaniu dostupných degradačných funkcií na výslednú ekonomickú efektívnosť (tak ako je uvedené aj v článkoch [2] a [3]). V súčasnosti sa výskum a modelové analýzy rozšírili aj na zmeny jednotlivých parametrov prevádzkovej spôsobilosti (drsnosť, stav porušenia krytu, priečnu a pozdĺžnu nerovnosť).

V rámci modelovania zmien je použitý národný rozhodovací výpočtový program ISEH s bližším zameraním na modelovanie zmien parametra pozdĺžnej nerovnosti. Pre rozsiahlosť riešenej problematiky sú uvedené v článku iba niektoré výstupy z modelovania zmien parametra pozdĺžnej nerovnosti v závislosti od degračnej funkcie VUIS pre nestmelené vozovky. V tomto článku sú uvedené výstupy z výpočtového programu a ich grafické znázornenie, zároveň bude preukázaný vplyv zmien parametra pozdĺžnej nerovnosti na ekonomické ukazovatele. Modelovanie zmien parametrov prevádzkovej spôsobilosti bude slúžiť ako poklad pre následnú analýzu citlivosti a následne k optimalizácii rozhodnutí správcov komunikácií.

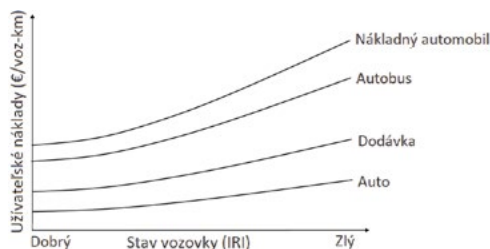
2 POPIS SÚČASNÉHO STAVU

Modelovanie zmien parametrov prevádzkovej spôsobilosti a prognóza ich vývoja sa používa ako prostriedok na predpovedanie obdobia, v ktorom vozovka dosiahne svoju medznú hodnotu. Vďaka dlhodobým meraniam o stave vozovky je umožnené plánovanie opráv, optimalizácia a predpovedanie budúcich zmien na vozovke. Dôležité je spomenúť, že významným faktorom pri tvorbe degračných modelov je zoskupenie rovnakých typov vozoviek (konštrukčne, technologicky, v závislosti od klimatických podmienok zaťaženia, apod.) [4]. Výsledok modelovania je ovplyvnený výberom vhodného rozhodovacieho výpočtového programu, ktorý má aplikované aktuálne degračné funkcie a ceny jednotlivých nákladových položiek vstupujúcich do technicko-ekonomického výpočtu. V súčasnosti možno nájsť v dostupnej literatúre mnoho degračných modelov, ktoré boli vytvorené použitím rôznych metód - u nás, ale aj v zahraničí sú rozdelené na deterministické a pravdepodobnostné modely [5]. V zahraničí možno tieto modely rozdeliť na modely založené na návrhových metódach, kde možno zaradiť AASHTO, MEPDG a rakúsku návrhovú metodiku. Spomenuté metodiky sú však staršieho dáta a preto sa pozornosť zameriava najmä na empirické a mechanicko-empirické modely. Medzi najpoužívanejšie metódy podľa posledných výskumov patria numerické regresné modely, modely neurónovej siete a krivky životnosti [6], [7].

Vo väčšine krajín sa používa súbežne okrem programu HDM-4 aj vlastný národný výpočtový systém, ktorý je v konečnom dôsledku lepšie prispôbený miestnym podmienkam. Empirické modely predikcie sú známe najmä pri softvéri ISEH, nakoľko sa jedná o národný program. Pre porovnanie, celosvetovo známy program HDM-4, pracuje s prediktívnymi degračnými modelmi, ktoré umožňujú stanoviť budúcu degradáciu vozovky. Dôležité je však poznamenať, že aj keď HDM-4 modeluje rôzne typy porúch, v konečnom dôsledku je nutná ich kalibrácia pre podmienky daného štátu. Táto kalibrácia eliminuje riziko rôzneho výkladu vstupov a predpokladá správnu interpretáciu výsledkov na efektívne stanovenie naliehavosti a poradia opravy. Z tohto dôvodu je možné tvrdiť, že veľkou nevýhodou programu je množstvo korekčných indexov, ktoré znižujú kontrolovateľnosť výsledkov a nezohľadňujú tak dostatočne zmenu parametrov prevádzkovej spôsobilosti počas doby analýzy [8]. Tieto korekčné indexy boli vytvorené na vozovkách s rôznymi vlastnosťami a konštrukciami, ktoré kvalitatívne nespĺňajú podmienky stanovené normami a technickými predpismi platnými pre podmienky SR.

Špecifickým problémom v rámci spomenutých výpočtových programov sú náklady a ich kvantifikovanie. Vplyv vyvíjajúceho sa trhového prostredia danej krajiny spôsobuje vo väčšine prípadov infláciu, preto je nutná neustála aktualizácia údajov nákladových položiek. Kalibrovanie vstupných údajov je pomerne časovo náročné, v dôsledku čoho dochádza väčšinou len k valorizácii údajov na základe vývoja ekonomiky [9].

Výpočtový program ISEH rieši náklady spojené s nehodovosťou a v softvéri sú vyjadrené iba percentuálnou mierou. Náklady na nehodovosť sa v HDM-4 kvantifikujú na základe vyvolaných nákladov v dôsledku nehody spôsobilých na majetku a následkov nehody so zdravotnými zraneniami. Užívateľské náklady možno definovať ako náklady na prevádzku vozidiel, náklady na cestovný čas a náklady na nehody. Medzi ďalšie náklady možno zaradiť náklady na znečistenie ovzdušia, náklady súvisiace s hladinou hluku, náklady na klimatické zmeny, environmentálne náklady, náklady na kongescie, na stratu biodiverzity a náklady na zníženie hodnoty majetku – ani jeden zo spomenutých nákladov však nie je doposiaľ kvantifikovaný [9], [10]. Pre porovnanie, vplyv pozdĺžnej nerovnosti na užívateľské náklady pre rôzne typy vozidiel je znázornený na Obr. 1.



Obr. 1 Závislosť pozdĺžnej nerovnosti a užívateľských nákladov [10].

3 METODIKA

Analýza problematiky modelovania zmien parametrov pozdĺžnej nerovnosti bola uskutočnená na modelovom príklade netuhej vozovky s nestmelenými podkladovými vrstvami. Z technického hľadiska sa jedná o opravu vozovky, na ktorej však nebol aplikovaný zásah vzhľadom na stav vozovky. Modelovali sa iba zmeny parametra pozdĺžnej nerovnosti IRI, ostatné vstupné parametre ostali rovnaké pre všetky analýzy. K zmene dochádzalo aj pri výbere triedy vozovky, kde boli vytypované vozovky ciest I., II. a III. triedy s jedným jazdným pruhom a obojsmerným úsekom, diaľnice ani miestne komunikácie neboli do analýzy zahrnuté.

Základné vstupné údaje pre modelové analýzy sú:

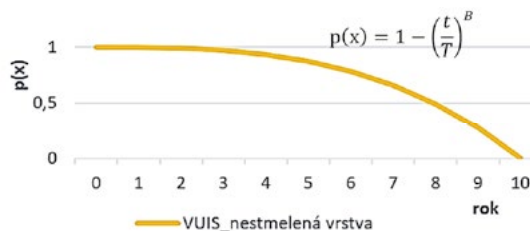
- 24 - hodinová intenzita: 1250 vozidiel
- Rok merania/výpočtu: 2020
- Rok začatia opravy: 2020
- Prvý rok prínosov: 2021
- Životnosť technológie: 10 rokov
- Náklady na opravu: 17 000 €
- Náklady na údržbu: 1 700 €
- Medziročný nárast dopravy: 2,00 %
- Diskontná sadzba: 5,00 %

Parameter pozdĺžnej nerovnosti bol postupne zadávaný v jednotlivých klasifikačných stupňoch a parameter IRI bol zvolený na základe okrajových hodnôt podľa TP 056 (viď. Tab. 1).

Tab. 1 Použité klasifikačné stupne v programe ISEH vyjadrené parametrom pozdĺžnej nerovnosti [11].

Klasifikačný stupeň	Parameter pozdĺžnej nerovnosti [m/km]
1	1,9
2	3,3
3	5,0
4, 5	10,0

V rámci modelovania zmien parametra pozdĺžnej nerovnosti v programe ISEH bol použitý nasledujúci degradačný model VUIS pre nestmelené vrstvy (Obr. 2), vytvorený na základe dlhodobého sledovania údajov o pozdĺžnej nerovnosti na experimentálnom úseku vozovky.

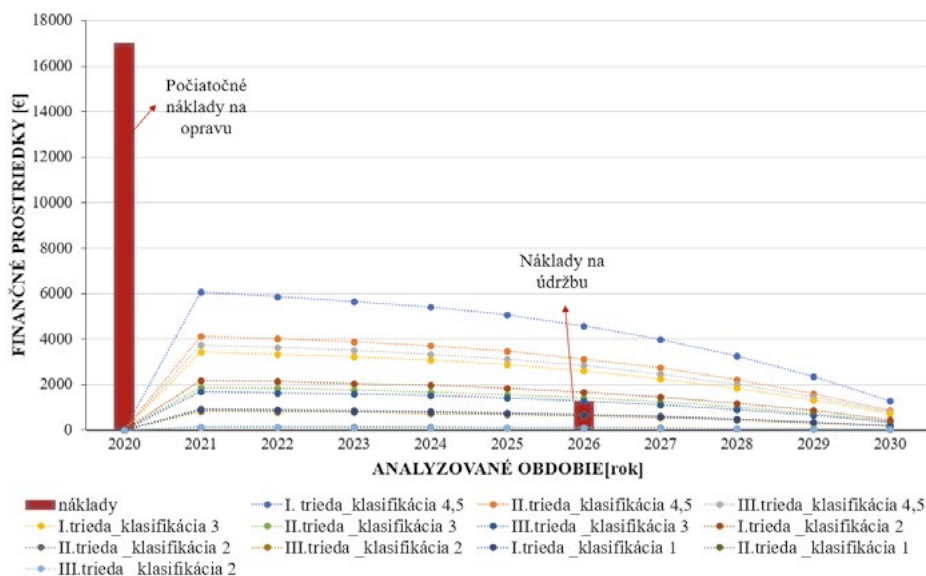


Obr. 2 Degradačný model VUIS pre nestmelené vrstvy (T - životnosť technológie stavebnej opravy v rokoch, B - parameter konštrukcie vozovky, t - čas, ktorý uplynul od začiatku používania alebo opravy vozovky) [12].

Vplyv namodelovaných zmien možno jednoducho popísať ukazovateľmi ekonomickej efektívnosti. Sledovanými ukazovateľmi sú: čistá súčasná hodnota, vnútorné výnosové percento a rok návratnosti investície. Čistá súčasná hodnota (ďalej len ČSH) v tomto prípade vyjadruje diskontované spoločenské prínosy a náklady, ktoré sú pridelené v rámci opravy a údržby komunikácie počas jej životnosti. Porovnávaný je stav vozovky pred opravou a po oprave. Pri ČSH platí, že čím je výsledná hodnota ukazovateľa vyššia, tým je aj ekonomický prínos opravy vyšší. Ďalší ukazovateľ - vnútorné výnosové percento (VVP) je možné zdefinovať ako obstarávaciu cenu za opravu a údržbu vozovky, pričom sa rovná predpokladaným spoločenským prínosom. Snahou je nájsť takú diskontnú úrokovú mieru, pri ktorej sa ČSH = 0. Posledným zo spomenutých ukazovateľov je rok návratnosti investície, pri ktorom očakávané spoločenské prínosy dosiahnu obstarávaciu cenu za opravu a údržbu vozovky. Za ekonomicky efektívny projekt možno považovať situáciu, kedy prínosy z opravy vozovky sa nachádzajú v intervale životnosti použitej technológie [13].

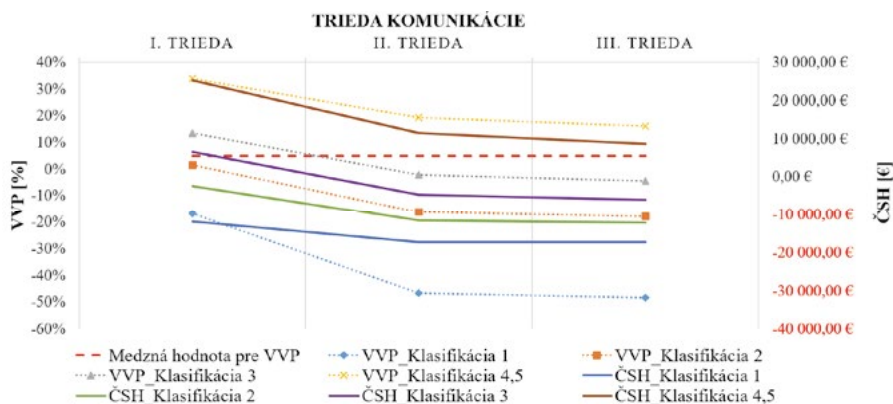
4 VÝSLEDKY

V rámci modelovania zmien bol použitý vyššie spomenutý degradačný model, ktorý je implementovaný v programe ISEH. Pri zmene triedy komunikácie si program automaticky upraví hodnotiace kritériá pre parameter pozdĺžnej nerovnosti. Priebeh zmien pri jednotlivých klasifikáciách IRI je možné vidieť na nasledujúcom Obr. 3. Na začiatku obdobia výpočtu v roku 2020 vstupujú do výpočtu investičné náklady (počiatočné náklady na opravu) v hodnote 17 000 €, ktoré sú v grafe (Obr. 3) doplnené o výšku užívateľských prínosov v rámci analyzovaného obdobia. V roku 2026 do výpočtu vstupujú náklady na údržbu vozovky v hodnote 1 700 €.



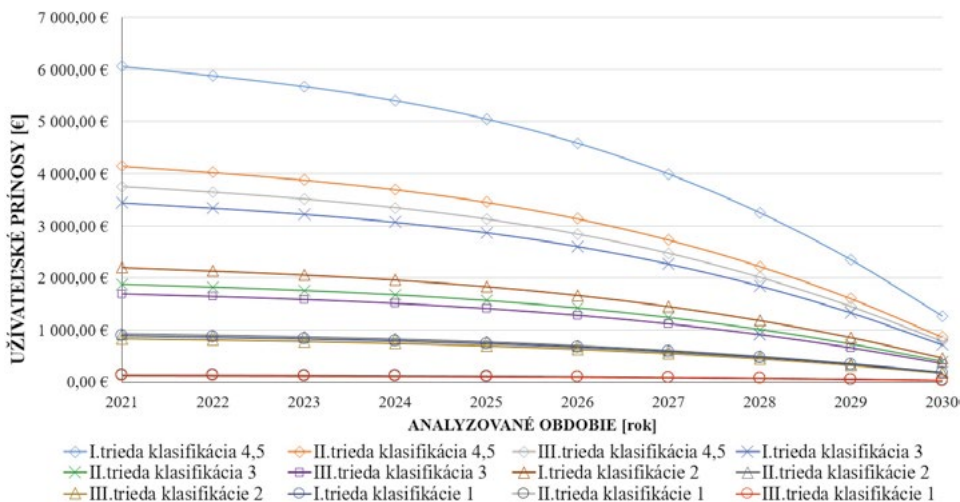
Obr. 3 Priebeh nákladov na opravu/užívateľských prínosov počas životného cyklu cesty.

Výsledné hodnoty sú ovplyvnené teda výberom degradačnej funkcie, ale aj samotným parametrom pozdĺžnej nerovnosti IRI. Najefektívnejšie by bolo opraviť vozovku, ktorá dosahuje hodnotu pozdĺžnej nerovnosti 10 m/km pri všetkých 3 triedach vozoviek a hodnotu 5, pri vozovke I. triedy. Pri ostatných klasifikačných stupňoch je oprava vozovky neefektívna. Ekonomickú efektívnosť je možné overiť aj v nasledujúcom grafe (Obr. 4), v ktorom sú uvedené výsledné hodnoty z modelovej analýzy, konkrétne ide vnútorné výnosové percento s medznou hodnotou stanovenou na 5% a čistou súčasnou hodnotou.



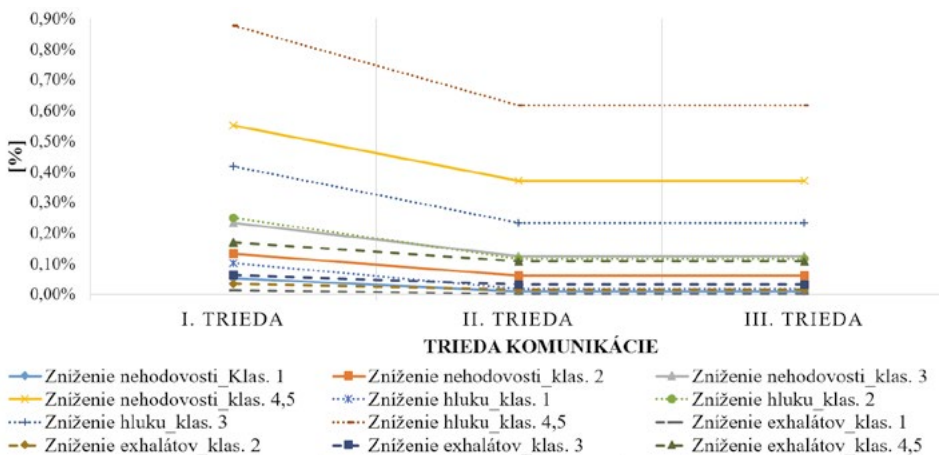
Obr. 4 Závislosť medzi vnútorným výnosovým percentom a čistou súčasnou hodnotou.

Priebeh modelovaných zmien je možné vidieť aj na nasledujúcom grafe (Obr. 5), v ktorom sú znázornené prínosy užívateľov za analyzované obdobie pre rôzne klasifikačné stupne a triedy vozoviek.



Obr. 5 Modelovanie zmien parametra IRI - priebeh prínosov užívateľov počas životného cyklu vozovky.

Ďalším z výstupov modelovania zmien je percentuálne znázornenie úspor externých nákladov (Obr. 6), týkajúcich sa zníženia nehodovosti, zníženia hluku a exhalátov. Podľa predpokladov, najväčšie úspory sú pri oprave vozovky v klasifikácii 4,5 pre vozovku I. triedy. Pre vozovky II. a III. triedy je vplyv parametra pozdĺžnej nerovnosti nižší, nakoľko modelovaný parameter nedosahuje pre tieto triedy vozovky hraničné hodnoty z hľadiska bezpečnosti. Zároveň sa tieto hodnoty v percentuálnom hodnotení neodlišujú a teda možno poznamenať, že externé úspory nákladov sú v tomto prípade totožné.



Obr. 6 Percentuálne znázornené úspory externých nákladov.

5 DISKUSIA

Modelovanie zmien parametrov prevádzkovej spôsobilosti (v tomto prípade parametra pozdĺžnej nerovnosti) je zdĺhavým a pomerne zložitým procesom, nakoľko do výpočtu vstupuje mnoho údajov ovplyvňujúcich výsledné hodnoty ekonomickej efektívnosti. Z vyššie uvedených výsledkov analýzy modelovania zmien parametra pozdĺžnej nerovnosti vyplýva, že aj zanedbateľná zmena premenného parametra má značný vplyv na výsledné

hodnoty ekonomických ukazovateľov. Najvyššie užívateľské prínosy podľa očakávaní dosiahla hraničná hodnota parametra pozdĺžnej nerovnosti (10 m/km) pri vozovke I. triedy, naopak najnižšie prínosy dosahoval parameter pri vozovke III. triedy s pozdĺžnou nerovnosťou 1,9 m/km.. Pri percentuálnych úsporách je situácia iná, pretože pre vozovku I. triedy sú tieto úspory významnejšie, zatiaľ čo pre vozovky II. a III. triedy sú v niektorých klasifikáciách totožné a zanedbateľné.

Z výsledkov modelových analýz vyplýva, že najefektívnejšia by bola oprava vozovky I. triedy za predpokladu, že parameter pozdĺžnej nerovnosti je v rozmedzí 3,7 m/km a viac. Pre vozovku II. triedy by ukazovateľ ekonomickej efektívnosti dosahoval prijateľné hodnoty pri parametri pozdĺžnej nerovnosti v rozmedzí 6,2 m/km a viac, pri vozovke III. triedy 6,8 m/km a viac. Tieto zistenia možno aplikovať aj v rámci zhodnotenia úspor externých nákladov.

6 ZÁVER

Výsledkom modelových analýz bolo zistenie ekonomickej efektívnosti opravy vozoviek použitím rôznych hodnôt parametra pozdĺžnej nerovnosti a ich porovnanie z rôznych hľadísk. V predošlom výskume sa pozornosť zameriavala najmä na zmeny ekonomickej efektívnosti pri použití rôznych degradačných funkcií, v súčasnosti sa pozornosť zameriava na zmeny parametrov prevádzkovej spôsobilosti. Prezentované výsledky vo svojej podstate splnili predchádzajúce hypotézy a budú ďalej slúžiť ako podklad pre analýzu citlivosti a určenie obdobia, v ktorom oprava vozovky bude najefektívnejšia. Cieľom výskumu je optimalizácia vynaložených nákladov správcov komunikácií a zároveň minimalizácia vynaložených zdrojov, či už finančných, materiálnych alebo energetických.

Použité zdroje

- [1] Boardman, A., Greenberg D., & Vining, A. 2011. Cost-Benefit Analysis (International Edition), New Jersey: Pearson Education Limited.
- [2] Durinova, M., Mikolaj, J. 2019. Evaluation of economic efficiency of the rehabilitation projects, In Sborník príspevku PROCEEDINGS. 2020. Ročník 22. ISBN 978-80-86433-73-8. s. 764-769
- [3] Durinova, M., Mikolaj, J. 2019. Definition of pavement performance models as a result of experimental measurements, In Transportation Research Procedia, Conference proceedings Transcom 2019, Elsevier B.V. roč. 40. 2019. ISSN: 2352-1465. 201-208
- [4] Pavement Remaining Service Interval Implementation Guidelines [online]. 2013. Dostupné na: <<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/13050/004.cfm>>
- [5] MIKOLAJ, J. a kol. 1995. Systém hospodárenia dopravných stavieb: súbor prednášok. Žilina: Krupa print BIZ. 2014. s. 76. ISBN 978-80-970698-3-4.
- [6] METODIKA pre používanie HDM-4 v podmienkach SR. Technické podmienky – 057. Ministerstvo dopravy a výstavby Slovenskej republiky [online], 2018. [cit. 2019-04-20]. Dostupné na internete: https://www.ssc.sk/files/documents/technicke-predpisy/tp/tp_057.pdf
- [7] SUSANNA A., CRISPINO M., GIUSTOZZI F., TORALDO E. 2017. Deterioration trends of asphalt pavement friction and roughness from medium-term surveys on major Italian roads, In International Journal of Pavement Research and Technology, Volume 10. 2017. p. 421-433. ISSN 1996-6814
- [8] KERALI H. G. R., ODOKI J. B., STANNARD E. E. Overview of HDM-4. Volume 1. The World Road Association (PIARC), 2006. p. 58. ISBN 2-284060-183-4.
- [9] MORISIUK G., RILEY M., TOOLE T. 2006. Applications guide. Volume 2. Paris: The World Road Association (PIARC), 2006. p. 133. ISBN 2-284060-184-2.
- [10] KERALI, H. G. R. – ODOKI, J. B. – STANNARD, E. E. 2006. The Highway Development and Management Series, version 2.0. Paris: World Road Association (PIARC), 2006. 58 s. ISBN: 2-84060-058-7
- [11] Technické podmienky, 2012. Meranie a hodnotenie nerovnosti vozoviek pomocou zariadenia Profilograph GE – TP 056 [online]. Ministerstvo dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja SR, Sekcia cestnej dopravy a pozemných komunikácií. 2012. s. 20. Dostupné na: <https://www.ssc.sk/files/documents/technicke-predpisy/tp/tp_056.pdf>
- [12] ŘIKOVSKÝ, V. 1993. Hodnotenie funkčnej spôsobilosti vozovky a ich zmien : úloha N05-514-904, č.u. 04 etapa 3. Bratislava : VUIS-CESTY spol. s r.o., 1993. 141 s.
- [13] VALUCH, M., 2014. Metodický postup hodnotenia ekonomickej efektívnosti použitia vozoviek a konštrukčných vrstiev. Žilinská univerzita v Žiline, 2014. s. 110

STUDIE POHYBU OBYVATEL VE MĚSTĚ BRNĚ

STUDY OF MOVEMENT OF POPULATION IN THE CITY OF BRNO

Jiří Rouzek¹

¹ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

Článek se zabývá problematikou přepravy obyvatel ve statutárním městě Brně, což je velmi aktuálním tématem. Vlivem probíhající suburbanizace, rostoucí životní úrovně a cen nemovitostí jsou na dopravu kladeny čím dál větší požadavky. Dopady spojené s nárůstem dopravy mají ekologický i ekonomický vliv na celou společnost. Výzkum, na úrovni města Brna, je založen na sběru a analýze údajů o dopravě získaných z dat mobilních operátorů a datech z ČSÚ. Cílem výzkumu bylo pomocí srovnávacího indexu zhodnotit aktuální stav dopravy v jednotlivých městských částech. Studie definuje lokality se zvýšenou dopravní zátěží.

Klíčová slova

Suburbanizace, doprava, udržitelný rozvoj, nemovitosti

Abstract

The article deals with the issue of transport of inhabitants in the statutory city of Brno, which is a very current topic. Due to the ongoing suburbanization, rising living standards and real estate prices, increasing demands are being placed on transport. The impacts associated with the increase in traffic have an ecological and economic impact on society.

The research at the level of the city of Brno is based on the collection and analysis of data on transport obtained from data from mobile operators and data from the CZSO.

The aim of the research was to use a comparative index to evaluate the current state of traffic in individual city districts. The study defines localities with increased traffic load.

Key words

Suburbanization, transport, sustainable development, real estate

1 ÚVOD

Aktuálně se město Brno připravuje na nový územní plán, který je založen na koncepčním modelu "krátkých vzdáleností". Principem modelu je zkrácení dojezdových vzdáleností obyvatel mezi místem bydliště, prací a občanskou vybaveností. Tím se mimo jiné šetří čas obyvatel na cestování, minimalizují se náklady na městskou hromadnou dopravu a sníží se s tím spojená ekologická zátěž. Aktuálně lze v okolí Brna sledovat dlouhodobý trend suburbanizace, jenž je doprovázen dlouhodobě rostoucími cenami nemovitostí. Tento stav vytváří tlak na obyvatele, kteří jsou nuceni hledat bydlení spíše v periferiích města Brna, kde jsou ceny za bydlení příznivější a za prací raději dojíždějí. Tento stav však doprovází řada negativních faktorů, které lze pozorovat již nyní. Přeplněné dálnice v dopravních špičkách, zvýšená nehodovost řidičů apod.

Práce zkoumá aktuální dopravní situaci v jednotlivých městských částech města Brna. Je založena na základě dat od mobilních operátorů a dat z Českého statistického úřadu (ČSÚ). Práce si klade za cíl definovat lokality, které jsou dopravou nejvíce zatíženy.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Suburbanizace představuje nejen změnu prostorového rozmístění obyvatel, ale i změnu fyzického a sociálního prostředí měst a jejich zázemí. Dopadů suburbanizačního procesu je celá řada a většina se přímo či nepřímo projevuje i v nárocích na dopravu [1]. Zatímco v období před masivním rozvojem automobilismu byl rozvoj příměstských sídel lokalizovaný především podél železnice, automobil umožnil růst do všech směrů s preferencí dálničních linií [2]. Pro rozvoj rezidenčních lokalit hraje úlohu i celková atraktivita lokality, vyjádřená

především kvalitou životního prostředí [3]. Převážně obytná předměstí jsou závislá na intenzivních kontaktech s jádrem aglomerace, což se projevuje výrazným nárůstem dopravní intenzity v radiálních směrech. "Urban sprawl" je problém expanze, při které působí disperse obytné funkce proti centralizaci pracovních příležitostí, čímž se vytváří hlavní zdroj tlaků na dopravu". Příkladem pozitivních dopadů na dopravu v zázemí českých měst je oprava komunikací či zlepšení dopravního spojení do obce zavedením nových linek hromadné dopravy [4]. Může docházet i k poněkud paradoxní protisměrnosti dojížděky, kdy do centra dojíždí za prací vysoce kvalifikovaní obyvatelé suburbii, zatímco maloobchod či skladovací funkce v zázemí zaměstnává obyvatele s nižší kvalifikací, kteří si zde bydlení nemohou dovolit [5].

J. Urbánková a M. Ouředníček ve své práci [1] zkoumají vliv suburbanizace na dopravu v Pražském městském regionu na základě dat o vývoji počtu obyvatel, počtu dopravních prostředků a počtu uskutečněných cest. Další práce [6] je založena na sčítání projíždějících automobilů na vybraných profilech výpadových komunikací. Práce [7] T. Peltana porovnává osobní a hromadnou dopravu z pohledu energetickou náročnost dojížděky.

Tato práce zkoumá stejnou problematiku novým způsobem. Studie je založena na datech z běžně využívaných zdrojů (SLDB 2010, ČSÚ) a na datech od mobilních operátorů. Výhoda využití tohoto zdroje dat je v jeho přesnosti. Díky sběru dat z mobilních signálů je možné relativně přesně určit, jaký počet lidí se nachází ve sledovaných lokalitách.

3 METODIKA

Index pohybu obyvatel vychází z analýzy dat zpracovaných mobilním operátorem T-Mobile. Sběr dat proběhl v říjnu roku 2018 ve městě Brně a Jihomoravském kraji. Měření probíhalo v hodinových intervalech, v pracovních dnech i o víkendech. Data byly v rámci této studie roztříděny a agregovány do skupin dle jednotlivých městských částí města Brna. Data z jednotlivých hodinových intervalů byla zprůměrována a byla stanovena odchylka mezi počtem obyvatel v dané lokalitě a počtem osob s trvalým bydlištěm v jednotlivých hodinách.

$$P_o = \frac{(\sum_{i=0}^n X_i - N)}{n} \quad (1)$$

P_o je průměrná odchylka za hodinu. Vypočítá se jako suma rozdílů počtu naměřených osob X_i a počtem osob s trvalým bydlištěm N , celé poděleno počtem hodin n .

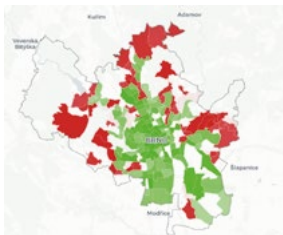
Vzhledem k tomu, že město Brno informace o počtu obyvatel v městských čtvrtích nezveřejňuje, byla pro tento účel použita data z ČSÚ ze sčítání lidu, domů a bytů z roku 2011 (SLDB 2011). Následně byl sestaven index, který udává množství naměřených lidí oproti počtu s trvalým bydlištěm.

$$I_{po} = \frac{100 \times P_o}{N} \quad (2)$$

I_{po} je Index pohybu obyvatel.

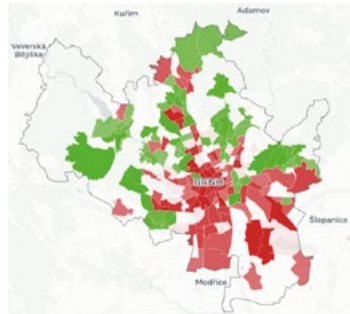
4 VÝSLEDKY

Na základě dat mobilních operátorů a dat z ČSÚ byla provedena analýza pohybu obyvatel v městských částech města Brna. Na následujících obrázcích je možné vidět změny v pohybu obyvatel v čase. Obr. 1 zachycuje pohyb obyvatel mezi 6 a 7 hodinou ráno. Je zde patrný přesun do centra města (zeleně), přičemž severní, východní a západní část města se vyliďňuje (červeně).



Obr. 1 Pohyb obyvatel ve městě Brně mezi 6 a 7 hodinou.

Obr. 2 zachycuje pohyb obyvatel v městských částech Brna mezi 16 a 17 hodinou. Oproti ranním hodinám je zde patrný pohyb obyvatel z centrální a jižní části města směrem k severní, východní a západní části.



Obr. 2 Pohyb obyvatel ve městě Brně mezi 16 a 17 hodinou.

Tab. 1 obsahuje výsledky prováděné studie. K jednotlivým městským částím jsou uvedeny počty sledovaných obyvatel, průměrné odchylky od obyvatel s trvalým pobytem a index pohybu obyvatel.

Tab. 2 Pohyb obyvatel ve městě Brně mezi 16 a 17 hodinou.

Městské části města Brna	Počet obyvatel (ob)	Průměrná odchylka (ob)	Index pohybu obyvatel (%)
Židenice	22 000	10 888	49,5
Černovice	8 024	3 867	48,2
Bohunice	14 683	5 403	36,8
Starý Lískovec	12 931	3 701	28,6
Královo Pole	28 674	6 885	24,0
Brno-sever	47 643	10 286	21,6
Brno střed	64 316	10 430	16,2
Brno-jih	9 690	877	9,0
Maloměřice a Obřany	5 621	381	6,8
Medlánky	5 898	399	6,8
Tuřany	5 674	331	5,8
Slatina	9 360	356	3,8
Žabovřesky	21 047	638	3,0
Řečkovice a Mokrá Hora	15 486	170	1,1
Bosonohy	2 457	1	0,0
Žebětín	3 577	13	0,4
Líšeň	26 781	519	1,9
Útěchov	760	18	2,4
Komín	7 457	190	2,5
Kohoutovice	12 621	413	3,3
Jehnice	1 102	40	3,7
Bystře	24 218	892	3,7
Ořešín	577	23	4,0
Chřlice	3 722	203	5,5
Jundrov	4 132	230	5,6
Ivanovice	1 746	154	8,8
Nový Lískovec	11 349	1 053	9,3
Kníničky	1 006	131	13,0

Na základě indexů u jednotlivých lokalit lze konstatovat, že nejvíce obyvatel se dopravovalo do čtvrtí Židenice, Černovice, a Bohunice. Židenice se vyznačují hustou dopravní sítí s dobrou dostupností do centra města a tím tvoří významný dopravní uzel. Vede zde i obchvat z dálnice D1. V Černovicích se nachází největší český průmyslový areál Černovické terasy, rozprostírající se na území o 200 ha. V Bohunicích se nachází komplex Fakultní nemocnice Brno. Naopak největší odsun obyvatel zaznamenaly městské čtvrti Kníničky, Nový Lískovec a Ivanovice, kde index vykázal záporná čísla, tzn. že se počet obyvatel pohyboval dokonce pod hranicí osob s trvalým pobytem.

5 DISKUZE A ZÁVĚR

Studie díky indexu pohybu obyvatel prokázala velké rozdíly v dopravní vytiženosti jednotlivých městských částí. V lokalitách s vyšší hodnotou indexu se lidé shromažďují, tráví zde svůj čas (vzhledem k časovému intervalu se jedná zejména o čas pracovní). Lokality se záporným indexem naopak lidé opouštějí. Tato varianta je taktéž neefektivní, jelikož obyvatelé opět spotřebovávají zdroje na dopravu. Čím nižší je index, tím méně se zde obyvatelé zdržují a svoji pracovní sílu a prostředky investují jinde. To neprospívá lokální ekonomice a hrozí například pokles tržeb u lokálních maloobchodů.

Práce je založena zejména na datech získaných od mobilních operátorů. Díky těmto datům lze relativně přesně stanovit počet lidí v určité době ve sledované lokalitě. Získání těchto dat pomocí jiné metody by bylo velice obtížné. Nevýhodou této metodiky je ovšem nutná spolupráce právě s mobilními operátory. Generovaná data o pohybu obyvatel lze zpřesnit zapojením více mobilních operátorů. Nevýhodou této metodiky je fakt, že je založena na reálných počtech obyvatel ve sledované lokalitě v určitém čase, ale nezohledňuje vzájemný pohyb mezi těmito lokalitami, který proběhl ve stejný čas. Pokud se 100 % obyvatel z lokality A dopraví do lokality B a naopak, a to ve stejný čas, za předpokladu, že v lokalitě A i B je právě stejný počet obyvatel, Index pohybu obyvatel se v těchto lokalitách nezmění. Tento faktor lze eliminovat například stanovením hustoty dopravy v jednotlivých směrech mezi sledovanými lokalitami.

Práce poukázala na oblasti s různou hodnotou Indexu pohybu obyvatel. Dalším krokem výzkumu je potvrzení či vyvrácení hypotézy, zda index cen ovlivňuje vývoje cen nemovitostí. Studie definovala lokality s minimálními a maximálními hodnotami indexů. V těchto lokalitách bude provedeno srovnání cen nemovitostí, jak u rezidenčního bydlení, tak u retail i u průmyslových objektech.

Poděkování

Tento příspěvek byl zpracován v rámci projektu specifického výzkumu na VUT v Brně č. FAST-J-20-6447, Vliv developerských projektů na sociálně-ekonomický rozvoj území.

Použitá zdroje

- [1] JANA URBÁNKOVÁ, MARTIN OUŘEDNÍČEK. Vliv suburbanizace na dopravu v Pražském městském regionu. 2006.
- [2] MAYER, H. (1967): The Pull of Land and Space In Gottmann, J., Harper, R., A. (eds.): *Metropolis on the Move: Geographers look at Urban Sprawl*, John Wiley and sons, Inc., New Yorks, s. 23-35.
- [3] OUŘEDNÍČEK, M. (2002): Suburbanizace v kontextu urbanizačního procesu. In: Sýkora, L. (ed.): *Suburbanizace a její sociální, ekonomické a ekologické důsledky*. Ústav pro ekopolitiku, Praha, s. 39–54.
- [4] DICKINSON, R. (1967): The Journey - to - Work. In Gottmann, J. Harper, R. A., (eds.): *Metropolis on the Move: Geographers look at Urban Sprawl*. John Wiley and sons: Inc., New York, s. 69-83.
- [5] SÝKORA, L. (2003): Suburbanizace a její společenské důsledky. *Sociologický časopis*, 39, č. 2, s. 217–233.
- [6] PETLAN, T., *Suburbanizace a energetická náročnost dojížděky*. 6/2012, Brno: Ústav územního rozvoje, 2012, Sv. ROČNÍK XV. ISSN: 1212-0855.
- [7] J. Heisig, J. Burian, J. Mišijovský, *Změny intenzity osobní automobilové dopravy a vliv na prostorovou diferenciaci suburbanizace*, *Perner's Contacts*. Univerzita Pardubice, 2011, pp. 84-91. ISSN: 1801 - 674X.

METODY HODNOCENÍ INVESTIČNÍCH A NEINVESTIČNÍCH PROJEKTŮ SILNIČNÍ INFRASTRUKTURY V ČR

EVALUATION METHODS OF INVESTMENT AND NON-INVESTMENT ROAD INFRASTRUCTURE PROJECTS IN THE CZECH REPUBLIC

Pavel Krupík^{*,1}

*pavel.krupik@fsv.cvut.cz

¹České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra ekonomiky a řízení ve stavebnictví, Tháškova 2077/7, 166 29 Praha

Abstrakt

Článek se zabývá strategickým plánováním projektů silniční infrastruktury. Prezentuje současné metody vyhodnocování investičních a neinvestičních projektů (dálnice a silnice první třídy), které má na starost Ředitelství silnic a dálnic České republiky. Dále uvádí výsledky dotazníkového šetření mezi kraji a 80 obcemi s rozšířenou působností, které mají na starost silnice druhé a třetí třídy a místní komunikace. Dílčí výsledky tohoto článku by měly posloužit k vypracování obecné metodiky sloužící k hodnocení investičních a neinvestičních projektů silniční infrastruktury v České republice, která sjednotí postupy vyhodnocování a tím přispěje ke Stavebnictví 4.0. Výzkum ukázal, že tato metodika má smysl pouze pro dálnice a silnice I., II. a III. tříd v majetku státu a krajů. Obce nerealizují nové místní komunikace natolik často, aby bylo nutné tento proces normalizovat za pomoci uvažované metodiky.

Klíčová slova

Silniční infrastruktura, metody hodnocení, strategické plánování, Stavebnictví 4.0

Abstract

The article deals with strategic planning of road infrastructure projects. It presents current methods of evaluating these investment and non-investment projects (highways and first class roads), which is in charge of the Road and Motorway Directorate of the Czech Republic. It also presents the results of a questionnaire survey between regions and 80 municipalities with extended powers, which are in charge of second and third class roads and local roads. The partial results of this article should then be used to develop a general methodology for evaluating investment and non-investment road infrastructure projects in the Czech Republic, which will unify the evaluation procedures and thus contribute to Construction 4.0. Research has shown that this methodology makes sense only for highways and roads I., II. and III. classes owned by the state and regions. Municipalities do not implement new local roads often enough that it is necessary to standardize this process using the considered methodology.

Key words

Road infrastructure, evaluation methods, strategic planning, Construction 4.0

1 ÚVOD

V České republice se pracuje na zavádění digitalizace ve stavebnictví a Stavebnictví 4.0, na čemž spolupracuje mimo jiné oddělení stavebních hmot Ministerstva průmyslu a obchodu. Tyto inovace spojené se čtvrtou průmyslovou revolucí se promítnou do všech fází nejen procesu přípravy projektů silniční infrastruktury, ale i do jejich realizace a údržby [4].

Článek má za cíl zmapovat stávající postupy vyhodnocování investičních i neinvestičních projektů silniční infrastruktury pomocí dotazníkového šetření. Tato rešerše bude posloužit k vypracování obecné metodiky sloužící k hodnocení investičních a neinvestičních projektů silniční infrastruktury v České republice, která sjednotí postupy vyhodnocování a tím přispěje ke Stavebnictví 4.0.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Pojem dopravní infrastruktura je definován v § 2 Zákona č. 416/2009 Sb., o urychlení výstavby dopravní, vodní a energetické infrastruktury a infrastruktury elektronických komunikací, ve znění pozdějších předpisů, [5] takto:

„a) stavby dálnic nebo silnic I. třídy nebo stavby s nimi související,
b) stavby dráhy celostátní nebo stavby s nimi související,
c) další stavby dopravní infrastruktury nebo stavby s nimi související umístované v plochách nebo koridorech vymezených v platné politice územního rozvoje, nebo
d) v územně plánovací dokumentaci vymezené veřejně prospěšné stavby dopravní infrastruktury nebo stavby s nimi související.“

Pojem pozemní komunikace je definován v § 2 Zákona č. 13/1997 Sb., o pozemních komunikacích, ve znění pozdějších předpisů, [6] takto:

„(1) Pozemní komunikace je dopravní cesta určená k užití silničními a jinými vozidly a chodci, včetně pevných zařízení nutných pro zajištění tohoto užití a jeho bezpečnosti.

(2) Pozemní komunikace se dělí na tyto kategorie:

dálnice,
silnice,
místní komunikace,
úcelová komunikace.“

§ 9 dále určuje vlastníka pozemních komunikací takto: „Vlastníkem dálnic a silnic I. třídy je stát. Vlastníkem silnic II. a III. třídy je kraj, na jehož území se silnice nacházejí, a vlastníkem místních komunikací je obec, na jejímž území se místní komunikace nacházejí. Vlastníkem úcelových komunikací je právnická nebo fyzická osoba.“

Dle Pravidel pro financování programů, staveb a akcí z rozpočtu Státního fondu dopravní infrastruktury lze v souladu s účelem SFDI z rozpočtu SFDI hradit investiční a neinvestiční výdaje, které vyplývají ze zákona [7]:

- a) investiční výdaje zahrnují především výstavba, rekonstrukce a modernizace dopravní infrastruktury
- b) neinvestiční výdaje obsahují údržbu a opravy dopravní infrastruktury.

3 METODIKA

Silniční infrastruktura v pojetí tohoto článku zahrnuje dálnice a silnice I. třídy ve vlastnictví státu, které spravuje Ředitelství silnic a dálnic, silnice II. a III. třídy, které většinou spravují kraji pověřené organizace, a místní komunikace ve vlastnictví obce.

Dotazníkové šetření bylo provedeno v červnu roku 2020 formou žádostí o poskytnutí informace dle zákona č. 106/1999 Sb., o svobodném přístupu k informacím. Dotazováno bylo Ředitelství silnic a dálnic, všechny kraje a 80 obcí s rozšířenou působností (abecedně - Aš až Krnov). V rámci průzkumu bylo zjišťováno, podle čeho se hodnotí investiční a neinvestiční projekty dopravní infrastruktury. Tedy zda investoři obecně mají zpracován strategický (akční) plán (program) a zda existuje nějaká databáze nebo seznam databáze všech projektů, které jsou uvažovány k realizaci i nad rámec strategického plánu.

4 VÝSLEDKY

V rámci literární rešerše bylo nalezeno několik publikací např. Transportation Decision Making: Principles of Project Evaluation and Programming z roku 2007, která poskytuje holistický přístup k rozhodování při vývoji a plánování dopravních projektů, což může odborníkům v oblasti dopravy pomoci optimalizovat jejich investiční možnosti [9]. Nebo studijní text Metody hodnocení veřejných projektů, který poskytuje nástroj k rozhodování o výběru nejvhodnějšího veřejného projektu v procesu zadávání [10].

Níže jsou uvedeny výsledky zjištěné během průzkumu. Kvůli přehlednosti jsou rozděleny dle typu vlastníků daných komunikací.

Dálnice a silnice I. třídy

Strategické plánování rozvoje sítě dálnic a silnic první třídy (investiční projekty) se prioritně provádí ekonomickým vyhodnocením projektů v souladu se směrnicí č. V-2/2012, změna č. 4 "Směrnice upravující postupy Ministerstva dopravy, investorských organizací a Státního fondu dopravní infrastruktury v průběhu přípravy investičních a neinvestičních akcí dopravní infrastruktury, financovaných bez účasti státního rozpočtu" [1]. Ta pro proces vyhodnocení ekonomické efektivity projektů dopravní infrastruktury odkazuje na Rezortní

metodikou pro hodnocení ekonomické efektivity projektů dopravních staveb [2] a Prováděcí pokyny pro hodnocení efektivity projektů dopravní infrastruktury [3].

V případě neinvestičních projektů dálnic a silnic první třídy se Ředitelství silnic a dálnic České republiky rozhoduje podle provedených mostních prohlídek a diagnostik. Parametry, na základě kterých se hodnocení oprav provádí a sestavuje plán oprav, jsou zejména: zbytková životnost, životnost opravy, stavební stav, intenzita dopravy, proměnné parametry vozovky (příčná nerovnost / vyjeté koleje, podélná nerovnost, únosnost, makrotextura, protismykové vlastnosti, poruchy).

Při hodnocení oprav a sestavování plánu oprav hraje dále roli: koordinace s akcemi dalších subjektů (obcí, správců navazujících komunikací či inženýrských sítí – například přilehlých chodníků, kanalizace apod.), časová i věcná koordinace z hlediska uzavírek komunikací a plánovaných objízdných tras (objízdné trasy vedou po komunikacích nižších tříd), i z hlediska samotného rozsahu uzavírek na jedné komunikaci i v jedné lokalitě.

Silnice II. a III. třídy

Strategické plánování rozvoje silnic II. a III. třídy ve vlastnictví krajů povětšinou zpracovávají pověřené organizace a finální schválení podléhá zastupitelstvem kraje. Bylo zjištěno, že z žádného právního předpisu nevyplývá povinnost zpracovávat „metodický pokyn, vnitřní nařízení nebo něco jiného“ podle čeho by investor (kraj) se při vyhodnocování projektů řídit ve smyslu, zda takový projekt realizovat či nikoliv.

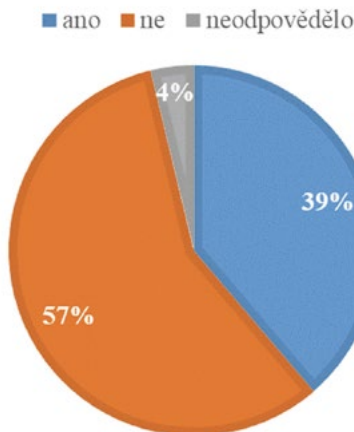
Z dotazování vyplynulo, že kraje mají zpracován nějaký metodický pokyn, vnitřní nařízení nebo něco jiného podle čeho se při vyhodnocování projektů řídí, zda ho realizovat či nikoliv. Jejich pojetí se však kraj od kraje dost podstatně liší a způsob hodnocení investičních nebo neinvestičních projektů dopravní infrastruktury není jednotný.

Pro utřídění zjištěných informací a jejich vyhodnocení je potřeba nastudovat získané dokumenty a kontaktovat podřízené organizace krajů pro jejich doplnění. Z tohoto důvodu není toto vyhodnocení obsaženo v tomto článku. Nicméně za zmínku stojí uvést, že dva z krajů používají tzv. Bílou knihu (Program investiční výstavby a oprav na silnicích II. a III. třídy). Jedná se o dokument, kam jsou zařazovány všechny plánované investice a opravy na komunikacích ve vlastnictví Jihočeského kraje ve stupni 4 a 5 při současném vyhodnocení dalších kritérií (7 kritérií, silnice s nejvyšším součtem přiřazených bodů má nejvyšší prioritu) po provedení daných prohlídek komunikací. Jednotlivé akce mají dány i stupeň priority (nízká, střední, vysoká) co se týká času realizace. Tato Bílá kniha je aktualizována jednou ročně.

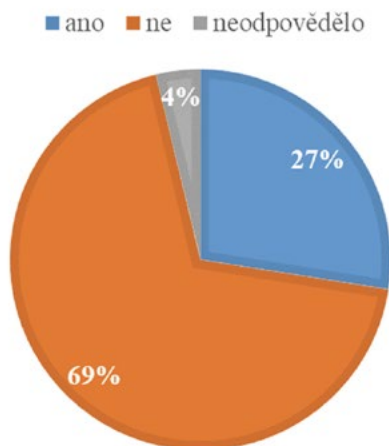
Místní komunikace

V rámci průzkumu bylo zjišťováno, zda obce s rozšířenou působností mají zpracován strategický (akční) plán (program) a zda existuje nějaká databáze nebo seznam databáze všech projektů, které jsou uvažovány k realizaci i nad rámec strategického plánu.

Bylo osloveno celkem 80 obcí s rozšířenou působností a z toho tři neodpověděly. Výsledky na položené otázky jsou názorně zobrazeny na Obr. 1 a Obr. 2.



Obr. 1 Je zpracován strategický (akční) plán (program)?



Obr. 2 Existuje nějaká databáze nebo seznam všech projektů, které jsou uvažovány k realizaci i nad rámec strategického plánu?

5 DISKUZE

Proces strategického plánování a metody hodnocení investičních a neinvestičních projektů silniční infrastruktury v České republice jsou u dálnic a silnic I. třídy rozpracovány dosti podrobně. Chybí však nějaký nástroj, podle kterého by se daly projekty připravené k realizaci porovnat a vybrat z nich jen některé, na které jsou vyčleněny finanční prostředky. S klesající důležitostí silniční infrastruktury se snižuje i obsáhlost a podrobnost strategického plánování. To také potvrzuje procento negativních odpovědí u tázaných obcí s rozšířenou působností, zda mají zpracován strategický (akční) plán (program) nebo zda existuje nějaká databáze nebo seznam všech projektů, které jsou uvažovány k realizaci i nad rámec strategického plánu. Je to dáno patrně také tím, že obce nerealizují investiční akce na výstavbu nových místních komunikací pravidelně a tudíž ani není nutné tento proces nějak normalizovat nebo standardizovat.

6 ZÁVĚR

Článek měl za cíl zmapovat stávající postupy vyhodnocování investičních i neinvestičních projektů silniční infrastruktury a strategické plánování pomocí dotazníkového šetření. Tato rešerše by měla posléze sloužit k vypracování obecné metodiky sloužící k hodnocení investičních a neinvestičních projektů silniční infrastruktury v České republice, která sjednotí postupy vyhodnocování a tím přispěje ke Stavebnictví 4.0. Výzkum ukázal, že tato metodika má smysl pouze pro dálnice a silnice I., II. a III. tříd v majetku státu a krajů. Obce nerealizují nové místní komunikace natolik často, aby bylo nutné tento proces normalizovat za pomoci uvažované metodiky. Sjednocení postupu u krajů dává autorovi smysl z toho pohledu, že některé kraje využívají docela fungující systém, který po doplnění některých bodů může docela dobře fungovat při obecném strategickém plánování. Při strategickém plánování dálnic a silnic I. třídy chybí nějaký nástroj, podle kterého by se daly projekty připravené k realizaci porovnat a vybrat z nich jen některé, na které jsou vyčleněny finanční prostředky. Bylo by naivní předpokládat, že bude neustále dostatek financí na realizaci všech projektů připravených k realizaci například vzhledem k plánované novelizaci stavebního zákona a tím pádem i urychlení schvalovacího procesu [8].

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS20/100/OHK1/2T/11.

Použitá zdroje

- [1] Česká republika. Ministerstvo dopravy. Směrnice č. V-2/2012 Změna č. 4, Směrnice upravující postupy Ministerstva dopravy, investorských organizací a Státního fondu dopravní infrastruktury v průběhu přípravy investičních a neinvestičních akcí dopravní infrastruktury, financovaných bez účasti státního rozpočtu [online]. [cit. 2020-10-08]. Dostupné z: [https://www.mdcr.cz/getattachment/Dokumenty/Ministerstvo/Vnitrozorní-předpisy-\(1\)/Vnitrozorní-předpisy/Smernice-V-2-2012,-zmena-c-4-dopravní-infrastruktura.pdf.aspx](https://www.mdcr.cz/getattachment/Dokumenty/Ministerstvo/Vnitrozorní-předpisy-(1)/Vnitrozorní-předpisy/Smernice-V-2-2012,-zmena-c-4-dopravní-infrastruktura.pdf.aspx)
- [2] Česká republika. Ministerstvo dopravy. Rezortní metodika pro hodnocení ekonomické efektivity projektů dopravních staveb [online]. [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: https://www.sfdi.cz/soubory/obrazky-clanky/metodiky/2017_02_rezortni_metodika-komplet.pdf
- [3] Česká republika. Ministerstvo dopravy. Prováděcí pokyny pro hodnocení efektivity projektů dopravní infrastruktury [online]. [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: https://www.sfdi.cz/soubory/obrazky-clanky/metodiky/2017_provadeci_pokyny_efektivnost.pdf
- [4] Digitalizace a Stavebnictví 4.0: Jak budou vypadat naše chytrá města? Tzbinfo [online]. 22.1.2020 [cit. 2020-11-13]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/20138-digitalizace-a-stavebnictvi-4-0-jak-budou-vypadat-nase-chytra-mesta>
- [5] Zákon č. 416/2009 Sb., Zákon o urychlení výstavby dopravní, vodní a energetické infrastruktury a infrastruktury elektronických komunikací
- [6] Zákon č. 13/1997 Sb., Zákon o pozemních komunikacích, ve znění pozdějších předpisů
- [7] Česká republika. Státní fond dopravní infrastruktury. Pravidla pro financování programů, staveb a akcí z rozpočtu Státního fondu dopravní infrastruktury Dostupné online na: <https://www.sfdi.cz/pravidla-metodiky-a-ceniky/pravidla-pro-financovani-z-rozpocetu-statniho-fondu-dopravní-infrastruktury/>
- [8] Nový stavební zákon. Ministerstvo pro místní rozvoj ČR [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://mmr.cz/cs/microsites/nasz/novy-stavebni-zakon>
- [9] SINHA, Kumares C. a Samuel LABI. Transportation Decision Making [online]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2007 [cit. 2020-12-17]. ISBN 9780470168073. Dostupné z: doi:10.1002/9780470168073
- [10] SOUKUPOVÁ, Jana. Metody hodnocení veřejných projektů: Studijní text on-line [online]. Brno, 2006 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1456/podzim2008/PVMHVP/um/Studijni_text_MHVP_on-line.pdf

MOŽNOSTI HODNOCENÍ MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZOU

POSSIBILITIES OF EVALUATION BY MULTICRITERIA ANALYSIS

Jakub Kotrla^{*,1}

*jakub.kotrla@vutbr.cz

¹Ústav architektury, Ústav pozemního stavitelství, Fakulta stavební, VUT v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Multikriteriální hodnocení v sobě skrývá spoustu potenciálu, jak vyřešit zdánlivě neřešitelný problém výběru správného řešení z několika možností. Pomocí základních údajů projektu, který nabízí více variant řešení, sestavíme kritéria a ty nám následně dopomůžou k výsledku. Projekty tak lze dostatečně analyzovat a nespolehat se pouze na řešení pomocí SWOT analýzy. Práce se zabývá řešením výběru vhodné varianty tak, aby výsledný projekt byl kvalitní, ekonomický a užitečný pro každý dotčený subjekt. Snaží se bourat pojem ceny jako hlavního a jediného kritéria ve výběru možností, které projekt nabízí, a tak nastává, že nejnižší cena ihned neznamená vítěze projektu.

Klíčová slova

Multikriteriální analýza, hodnocení, varianty, kritéria

Abstract

Multicriteria evaluation has a lot of potential to solve the seemingly unsolvable problem of choosing the right solution from several options. Using the basic data of a project that offers more variants of solutions, we will compile criteria and they will then help us to achieve the result. Projects can be sufficiently analysed and not rely solely on solutions using SWOT analysis. The work deals with the solution of selecting a suitable variant so that the resulting project is high quality, economical and useful for each subject. It tries to break down the concept of price as the main and only criterion in the selection of options that the project offers, and so it happens that the lowest price does not immediately mean the winner of the project.

Key words

Multicriteria analysis, evaluation, variants, criteria

1 ÚVOD

Práce řeší možnosti hodnocení multikriteriální metodou při výběru nejvhodnějšího projektu z více variant. Multikriteriální hodnocení nenahrazuje vyhodnocení CBA metodou, dokáže ho však vhodně doplnit. Na vhodném příkladu, tedy hodnocení projektů dopravní obslužnosti města, je prezentován postup hodnocení při zvolení několika typů metod, které jsou rozčleněny na hodnocení typů vah kritérií a typů samotného hodnocení. Metoda tak na základě požadavků, kritérií, dokáže jednoduše a přehledně pomoci jasných výsledků specifikovat nejvhodnější variantu pro řešení.

Nejdůležitějším a také nejvíce náročným, ať už časově či z hlediska pracnosti, není multikriteriální hodnocení samotné, ale sběr a zpracování dat, ze kterých se pak hodnocení provází. U projektů dopravních staveb návod na definování kritérií a jednotlivý výpočet vstupních hodnot názorně specifikuje rezortní metodika pro hodnocení ekonomické efektivity projektů dopravních staveb. Ani zde však nejsou stanoveny všechny hodnoty, které by k hodnocení byly potřeba. Je tedy nutné, pro objektivní a správné posouzení, vyžádat si data například přímo od dopravců, či výrobců, také z lokálních studií sledujících danou problematiku nebo ze strategií, kterými jednotlivá města disponují. Závěrem toho všeho vychází jedno jediné číslo z hodnocení, které určuje ukazatel požadované shody, tedy názorně uvádí, jak moc dané řešení vyhovuje zadaným požadavkům. Prezentované hodnoty jsou údaje pro konkrétní projekty, které byly čerpány z lokálních studií či dat města Vsetín, které byly získány pro účely diplomové práce autora a zhodnocení neoptimálnější zvolené dopravy.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Multikriteriální analýza (Multi-criteria analysis), je druhou nejpoužívanější srovnávací analýzou hned po analýze nákladů a užiteků CBA (Cost Benefits Analysis). Je to tedy analýza, která porovnává více hledisek a je užitečná, když jsou cíle projektu těžko postižitelné jinými výpočty a posuzováním. Posuzuje zpravidla více variant projektu za pomoci kritérií a podkritérií a jim zvoleným vahám. Tyto kritéria mohou být volena z odlišných oblastí a k různým cílům. Multikriteriální hodnocení je vhodné zejména tehdy, kdy nelze použít jednoznačně metodu CBA z důvodů, kdy nejsou známy přesné finanční hodnoty a postupy a v projektech a variantách figurují zejména užítky socioekonomické, tedy takové významné užítky, které nelze peněžně vyjádřit. Oproti CBA je multikriteriální analýza určena pro řešení většího množství různých cílů, které nelze běžně přesně vyjádřit pomocí cen a sociální prospěšnosti tak, jak je tomu u CBA. Tyto cíle však mohou být vnímány společností odlišně, a proto je každý výpočet multikriteriální analýzy ovlivněn subjektivním názorem zpracovatele a odborníků, kteří se analýzy účastní. Multikriteriální analýza tak nemá jasně stanovené hranice, kdy daný projekt vyhovuje či nikoliv a je tedy vhodnější na porovnávání více variant a doporučení té nejlepší. Výsledkem hodnocení bude tedy pořadí variant od nejvhodnější po tu nejméně vhodnou. Optimálním (někdy kompromisním) řešením je jmenována ta varianta, která nejvíce vyhovuje zadaným kritériím, tedy varianta, která vyhovuje společenské potřebě projektu, tzv. kritériu potřebnosti [1].

3 METODIKA

K práci byla používána Rezortní metodika ministerstva dopravy pro hodnocení ekonomické efektivnosti projektů dopravních staveb. Metodika popisuje z velké části základní hodnocení projektů dle metody CBA, která je považována za standardní metodu hodnocení investičních projektů. Konkretizuje však také hodnocení pomocí multikriteriální analýzy, které se věnuje tento článek.

Multikriteriální hodnocení lze uskutečnit v několika jednoduchých krocích, a to:

- Formulace (vymezení) záměru a stanovení jeho cílů.
- Stanovení variant řešení záměru.
- Sestavení hodnotících kritérií.
- Přiřazení vah jednotlivým kritériím.
- Hodnocení variant a jejich srovnávání (transformace na společné jednotky a posléze ohodnocení vahami).
- Rozhodnutí o konečném pořadí variant (pomocí ukazatele).

Hodnotitel by měl co nejobektivněji reflektovat společenskou potřebu a zadaná hodnotící kritéria. Ta by měla být komplexní, relevantní a neměla by dovolovat a umožňovat dvojí započtení.

Klíčovým vstupem jsou nejen vstupní data, která se vyhodnocují, ale především váha jednotlivých kritérií, kdy je potřeba při jejich stanovování postupovat velmi důkladně a uvážlivě. Váhy se totiž podílejí významným způsobem na výsledku celého hodnocení.

Typickým využitím multikriteriální analýzy může být rozhodování o trase silničního obchvatu přes území města. Dalším užitím analýzy může být i volba dovolené. Vhodným zvolením kritérií jako je cena zájezdu, komfort, cenová hladina, možnost vyžití a dalších, může být vybrán vhodný kompromis v případě neshody [1].

Typy hodnocení v multikriteriální analýze

Pro potřeby a možnosti analyzovat a posuzovat výsledky byly v práci použity tři typy hodnocení. Prvním z nich byla tzv. tvrdá metoda výpočtu. Výpočet transformace, tedy přepočtu základních údajů na společné jednotky, probíhal jednoduše. Varianta, která splňovala požadavky nejlépe dostala v tabulce multikriteriální analýzy přiřazenou jedničku, varianta, která splňovala požadavky nejhůře, dostala přiřazenou nulu. Ostatní výsledky byly interpolovány na mezilehlé hodnoty.

Druhý způsob výpočtu byl stanoven kardinálním (procentuálním) výpočtem. Varianta, která splňovala nejlépe požadavky, dostala přiřazenou hodnotu jedna. Ostatní hodnoty byly procentuálně vypočteny právě s touto hodnotou. V tomto případě výsledek s nulovou hodnotou vychází ve výpočtu velmi ojediněle. Znamená to, že i když je jedna varianta z hodnocených nehorší, stále může být další varianta, která není zatím hodnocena, na tom ještě hůř.

Třetí způsob výpočtu je ordinální klasifikační stupnicí. V tomto případě bylo zvoleno řazení výsledků od nejlepšího po nehorší, tedy stupnice 1-4. Pokud měly některé varianty shodně základní údaje, dostaly stejné ohodnocení.

Určování vah – odhad vah kritérií v multikriteriální analýze

Váhy jsou v multikriteriální analýze jedním ze středobodů výpočtu. Ovlivňují razantním způsobem výpočet. Správným a objektivním určením vah (odhadem vah) je docíleno i objektivního výsledku. Váhy by měly být rozděleny spravedlivě, a hlavně podle důležitosti kritérií.

Váhy kritérií byly v této práci určeny dvěma způsoby. Nejdříve byly váhy určovány na základě odborného odhadu, zkušeností, znalosti místní problematiky a při důkladném zvážení všech hledisek kritéria. Obdobně by se mohlo postupovat vypracováním několika odborných posudků různých odborníků, které by se pak prodiskutovaly a na základě konsenzu by se určily váhy. V praxi bude záležet například i na zadavateli, který může vyslovit požadavky, jak mají být kritéria ohodnocena.

Druhý způsob určování vah byl proveden na základě Saatyho metody. Jedná se jednu z nejčastěji používaných metod na stanovování vah pomocí párového srovnávání kritérií. Každé kritérium je hodnoceno s každým [2].

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	Počet priorit	Váha kritéria
K1 Nehodovost náklady	0	0	0	0	0	0	1	0	2	5,56 %
K2 Náklady času	1	0	0	1	1	0	1	0	5	13,89 %
K3 Náklady na přepravu	1	1	0	1	1	0	1	1	7	19,44 %
K4 Náklady na hluk	1	0	0	0	0	0	1	0	3	8,33 %
K5 Emise	1	0	0	1	0	0	1	0	4	11,11 %
K6 Investiční náklady	1	1	1	1	1	0	1	1	8	22,22 %
K7 Počet přepravených osob	0	0	0	0	0	0	0	1	2	5,56 %
K8 Předpokládané výnosy	1	1	0	1	1	0	0	0	5	13,89 %

Obr. 1. Rozdělení vah Saatyho metodou.

4 VÝSLEDKY

Nejdůležitějším krokem tedy bylo sestavit tabulky pro multikriteriální hodnocení, zde tabulky hodnotící projekt dopravní obslužnosti města na základě dopravního prostředku. K těmto variantám projektu byly stanoveny kritéria, tedy důležité aspekty pro provozovatele těchto systémů, které byly ekonomicky vyčísleny. I kritéria nefinančního charakteru byly převedeny a finančně ohodnoceny (nejčastěji se jedná o hluk, emise, čas a další...).

Dále tedy byly stanoveny váhy dle metod výše. Tím byla získána základní hodnotící tabulka. Ze základních údajů se posléze dle stanovených postupů jednotlivých typů hodnocení přetransformovaly tyto hodnoty na společné jednotky a v dalším kroku jim byla dle transformovaných hodnot přidělena míra užítku.

Při sečtení všech výsledků kritérií u jednotlivých variant projektu je dosaženo ukazatele požadované shody, který vyjadřuje míru shody s našimi stanovenými kritérii u každé z variant.

Pro ukázkou, jak výpočet probíhá, je níže v Tab. 1, 2, 3 a 4 kompletní postup hodnocení tvrdou metodou výpočtu, dále jsou pro názornost a odlišnost hodnocení uvedeny transformované hodnoty při použití metody kardinálního (procentuálního) hodnocení v Tab. 5 a metody dle ordinální klasifikační stupnice v Tab. 6. Hodnoty vstupních údajů vycházejí ze studií a dat poskytnutých městem Vsetín pro diplomovou práci autora. Jsou tedy platné pouze pro tento případ a nejsou nijak zobecněny [3].

Tab. 1 Hodnocení tvrdou metodou výpočtu dle vah určených odborným odhadem – základní údaje [3].

ZÁKLADNÍ ÚDAJE	VÁHA	AUTO	BUS	MIKROBUS	LANOVKA
Nehodovost (Kč/rok)	5	1 572 858,00	26 422,30	23 415,48	0,00001
Náklady času (Kč/os)	8	8,41	19,61	28,02	7,00
Náklady na přepravu (Kč/osoba/rok)	21	17,61	17,57	12,06	4,57
Náklady na hluk (Kč/rok)	6	4 356 116,00	4 573 380,00	4 573 380,00	0,00001
Emise (Kč/rok)	13	2 124 707,90	545 358,24	86 266,34	1 056 007,21
Investiční náklady za období 30 let (Kč)	28	891 390 00,00	40 277 00,00	36 101 00,00	290 685 47,00
Počet přepravených osob za den	5	1190	342	342	3000
Předpokládaný výnos (Kč/rok)	14	255 500,00	1 497 960,00	1 497 960,00	13 140 000,00

Tab. 2 Hodnocení tvrdou metodou výpočtu dle vah určených odborným odhadem – transformace [3].

TRANSFORMACE	VÁHA	AUTO	BUS	MIKROBUS	LANOVKA
Nehodovost (Kč/rok)	5	0,0000	0,9832	0,9851	1,0000
Náklady času (Kč/os)	8	0,9329	0,4001	0,0000	1,0000
Náklady na přepravu (Kč/osoba/rok)	21	0,0000	0,3067	0,4256	1,0000
Náklady na hluk (Kč/rok)	6	0,0499	0,0000	0,0000	1,0000
Emise (Kč/rok)	13	0,0000	0,7745	1,0000	0,5243
Investiční náklady za období 30 let (Kč)	28	0,0000	0,9951	1,0000	0,7023
Počet přepravených osob za den	5	0,3190	0,0000	0,0000	1,0000
Předpokládaný výnos (Kč/rok)	14	0,0000	0,0965	0,0965	1,0000

Tab. 3 Hodnocení tvrdou metodou výpočtu dle vah určených odborným odhadem – míra užítku [3].

MÍRA UŽÍTKU	VÁHA	AUTO	BUS	MIKROBUS	LANOVKA
Nehodovost (Kč/rok)	5	0,0000	4,9160	4,9256	5,0000
Náklady času (Kč/os)	8	7,4634	3,2008	0,0000	8,0000
Náklady na přepravu (Kč/osoba/rok)	21	0,0000	6,4417	8,9379	21,0000
Náklady na hluk (Kč/rok)	6	0,2993	0,0000	0,0000	6,0000
Emise (Kč/rok)	13	0,0000	10,0679	13,0000	6,8156

Investiční náklady za období 30 let (Kč)	28	0,0000	27,8633	28,0000	19,6655
Počet přepravených osob za den	5	1,5952	0,0000	0,0000	5,0000
Předpokládaný výnos (Kč/rok)	14	0,0000	1,3505	1,3505	14,0000

Tab. 4 Hodnocení tvrdou metodou výpočtu dle vah určených odborným odhadem – ukazatel požadované shody [3].

UKAZATEL POŽADOVANÉ SHODY	100	9,3578	53,8401	56,2140	85,4811
--	-----	--------	---------	---------	---------

Tab. 5 Transformované hodnoty při hodnocení kardinální (procentuální) metodou výpočtu dle vah určených odborným odhadem [3].

TRANSFORMACE	VÁHA	AUTO	BUS	MIKROBUS	LANOVKA
Nehodovost (Kč/rok)	5	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
Náklady času (Kč/os)	8	0,8323	0,3570	0,2498	1,0000
Náklady na přepravu (Kč/osoba/rok)	21	0,2595	0,2601	0,3789	1,0000
Náklady na hluk (Kč/rok)	6	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
Emise (Kč/rok)	13	0,0406	0,1582	1,0000	0,0817
Investiční náklady za období 30 let (Kč)	28	0,0405	0,8963	1,0000	0,1242
Počet přepravených osob za den	5	0,3967	0,1140	0,1140	1,0000
Předpokládaný výnos (Kč/rok)	14	0,0194	0,1140	0,1140	1,0000

Tab. 6 Transformované hodnoty při hodnocení kardinální (procentuální) metodou výpočtu dle vah určených odborným odhadem [3].

TRANSFORMACE	VÁHA	AUTO	BUS	MIKROBUS	LANOVKA
Nehodovost (Kč/rok)	5	4	3	2	1
Náklady času (Kč/os)	8	2	3	4	1
Náklady na přepravu (Kč/osoba/rok)	21	4	3	2	1
Náklady na hluk (Kč/rok)	6	2	3	3	1
Emise (Kč/rok)	13	4	2	1	3
Investiční náklady za období 30 let (Kč)	28	4	2	1	3
Počet přepravených osob za den	5	2	3	3	1
Předpokládaný výnos (Kč/rok)	14	3	2	2	1

Tab. 7 Výsledky ukazatelů požadované shody ze všech typů hodnocení [3].

VÁHY DLE ODBORNÉHO ODHADU	AUTO	BUS	MIKROBUS	LANOVKA
Tvrdá metoda výpočtu	9,3578	53,8401	56,2140	85,4811
Kardinální výpočet (procentuální)	16,0254	37,6371	53,1223	63,5394
Ordinální klasifikační stupnice	30,9167	42,5000	66,6667	72,6667
VÁHY DLE SAATYHO METODY	AUTO	BUS	MIKROBUS	LANOVKA
Tvrdá metoda výpočtu	15,1476	49,0427	48,4211	80,8807
Kardinální výpočet (procentuální)	20,43226	33,9055	46,38389	62,66718
Ordinální klasifikační stupnice	33,1025	41,20333	60,8775	77,78

5 DISKUZE

Je tedy zřejmé, která metoda hodnocení pomocí multikriteriální analýzy je nejlepší?

Z Tab. 7 Výsledky ukazatelů požadované shody ze všech typů hodnocení jednoznačně nevyplývá, jakou metodu používat přednostně, nebo která metoda by byla chybná. Jdou zde vidět odlišnosti, které jednotlivé hodnocení přinášejí, a tyto odlišnosti se dají dále využívat v interpretaci výsledků hodnocení. To však pro ty, kteří neznají možnosti, jaké zde byly představeny, může značně zkreslit výsledek, jelikož z objektivního hodnocení se může použít subjektivní interpretace. Při prezentaci všech metod výpočtu však může dojít k ujištění, že k vybrané variantě by došlo i při použití jiných metod výpočtu.

Každá z metod má své uplatnění při prezentování výsledků. Pokud by výsledky potřeboval prezentovat obchodník pro svůj výrobek, je pro něj nejlepší vzít výsledky pomocí tvrdé metody výpočtu, kde lze vidět velké rozdíly mezi nejlépe a nejhůře hodnocenou variantou, kde i mezi ostatními výsledky jsou viditelné rozdíly. Naopak pokud by produkt neskončil tak, jak bylo potřeba, nejlépe je tentokrát vzít výsledky ordinální klasifikační stupnice, kdy je škála výsledků mnohem blíže u sebe, a tak ani automobil oproti autobusu nevypadá tak špatně, jak by vypadal v případě prezentace tvrdé analýzy.

6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo pomocí multikriteriální analýzy zjistit a doporučit nejefektivnější dopravní variantu. Byla představena metodika, jakou lze multikriteriální analýzu vyhodnocovat a také vysvětleny nejdůležitější kroky, pro správné hodnocení. Dále byly představeny možnosti hodnocení.

Pomocí těchto variant výpočtů bylo dosaženo několika výsledků, které byly následně analyzovány, a i přes rozdílné postupy byl vybrán společný efektivní výsledek. Analýza tak ukázala, že i rozdílné metody docházejí k velmi podobným výsledkům při zachování stejných hodnotících kritérií, avšak každá metoda může být použita k jiné prezentaci výsledků, na základě rozmanité škály vyhodnocování.

Použité zdroje

- [1] Rezortní metodika pro hodnocení ekonomické efektivnosti projektů dopravních staveb [online]. [cit. 2020-11-14].
- [2] Fotr, J. & Švecová, L., 2010. Manažerské rozhodování: postupy, metody a nástroje 2., přeprac. vyd., Praha: Ekopress.
- [3] Kotrla, Jakub. Využití multikriteriální analýzy pro hodnocení efektivnosti projektu lanové dráhy [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=202210.

MODELÝ ODPADOVEHO HOSPODÁRSTVA A ICH MOŽNOSTI POUŽITIA V EKONOMICKÝCH ANALYZACH

WASTE MANAGEMENT MODELS AND THEIR POSSIBILITIES OF USE IN ECONOMIC ANALYZES

Martin Marek^{*,1}

* martinmarek@me.com

¹Ústav stavební ekonomiky a řízení, Fakulta stavební, VUT v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Článek sa zaoberá identifikáciou a hodnotením modelov používaných pri manažmente odpadového hospodárstva. Štúdia predkladá analýzu viacerých už existujúcich modelov, vrátne výberu optimálneho spôsobu implementácie hodnotenia v oblasti odpadového hospodárstva do CBA. Efektívne nakladanie s odpadom umožňuje ochranu ľudského zdravia, znižovanie znečisťovania životného prostredia, šetrenie prírodných zdrojov a dosiahnutie udržateľného a výnosného hospodárstva s energiou. Rôzne modely poskytujú miestnym orgánom rozhodovacie nástroje pri plánovaní dlhodobých scenárov nakladania s odpadom.

Kľúčové slová

CBA, odpadové hospodárstvo, analýza, LCA, ekológia

Abstract

The article deals with the identification and evaluation of models used in waste management. The study presents an analysis of several existing models, incl. selecting the optimal way to implement waste management assessment in the CBA. Efficient waste management enables the protection of human health, the reduction of environmental pollution, the protection of natural resources and the achievement of sustainable and profitable energy management. Different models provide local authorities with decision-making tools when planning long-term waste management scenarios.

Key words

CBA, waste management, analysis, LCA, ecology

1 ÚVOD

Analýza nákladov a prínosov a jej prepojenie na ekológiu

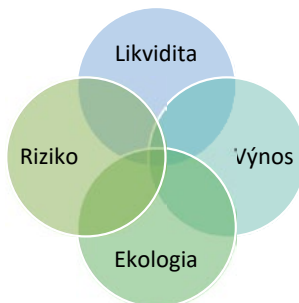
Stav a potenciálna úloha CBA v ekologickej ekonomii sú kontroverzné a uvádzajú niekoľko námietok a kritik. Historicky bola CBA vyvinutá na hodnotenie dobre definovaných malých projektov, ale aj na tejto úrovni projektov často existuje skepticizmus v súvislosti s potrebnými zjednodušeniami a predpokladmi. Skepticizmus sa zvyšuje, keď sa CBA používa na problémy v celosvetovej mierke, kde nejasnosti týkajúce sa problémov životného prostredia, možných vplyvov a oceňovania vyvolávajú ďalšie výzvy.

V počiatočných dňoch CBA je životné prostredie alebo environmentálne hodnoty, z veľkej časti považované za ťažko zmerateľné. Opomenutie životného prostredia v CBA sa nepovažovalo za hlavný nedostatok. Ťažko získateľné údaje sú najmä pri oceňovaní environmentálnych zdrojov, ľudského života a iné zložitejšie merateľné zdroje. Neznamená to však že by tieto údaje neboli vyčíslené.

Niektoré štúdie trvajú na použití peňažných hodnôt, ktorými sa dajú porovnávať projekty a rozhodnutia, iné sú proti kladeniu peňažných hodnôt na veci, ktoré nie sú bežne dostupné a predajné na trhoch, pretože tento tovar je nehmotný. Nehmotné položky sú „na nezaplatenie“ a akákoľvek trhovú hodnotu, ktorú tomuto tovaru je možné pripísať, hovorí málo o ich spoločenskej hodnote. Ťažko zmerať hodnotu nehmotných aspektov ekosystémov pretože tieto hodnoty patria ku kognitívnym a emocionálnym aspektom ľudských bytostí a jednotlivci môžu byť

neschopní alebo môžu skresľovať výsledok, aby sa tieto hodnoty mohli speňažiť. V dôsledku toho sú tieto položky pri analýze pravdepodobne podhodnotené. Aj v prípade ekosystémov sa blížila ku kritickým ekologickým prahom, stanú sa nenahraditeľnými a významnými hodnotami (t. j. ochota platiť). Zvyšuje ekonomické zhodnocovanie zmysluplné.

Zatiaľ čo prax CBA má tendenciu speňažovať všetky hodnoty, niektorí CBA sprievodcovia a štúdie uznávajú, že nie všetky náklady a prínosy sú reálne speňažené a tieto nepenažné náklady a prínosy sú zahrnuté v CBA popri peňažných hodnotách. Dá sa súhlasiť s tým, že nepenažné náklady a prínosy sú dôležité a mali by byť súčasťou rozhodovacieho procesu popri menovej metóde výpočtov CBA. Zahrnutie vplyvov na životné prostredie v CBA je komplexné.



Obr. 1 Rozšírenie trojuholníka investovania o ekológiu.

Odpadové hospodárstvo

Prvými modelmi odpadového hospodárstva v 70. rokoch boli optimalizačné modely, ktoré sa zaoberali konkrétnymi aspektmi problému, napríklad smerovaním vozidiel. Modely vyvinuté v 80. rokoch rozšírili systémové hranice predchádzajúcich modelov a pokrývali správu manažmentu odpadového hospodárstva na systémovej úrovni.

Modely sa zameriavali na vzťahy medzi rôznymi faktormi v systéme odpadového hospodárstva, a nie na každý zvlášť. Tieto modely sa zameriavali na minimalizáciu nákladov na nakladanie so zmesovým odpadom a do istej miery zahŕňali recykláciu. Príkladom takýchto prístupov je pokus Robergeho a Baetza z roku 1994 formulovať problém ako problém všeobecného zmiešaného a celočíselného lineárneho programovania (MILP). Gottinger sa v roku 1991 pokúsil o ekonomizáciu prevádzky systémov odpadového hospodárstva tiež pomocou MILP [1],[2]. V 90. rokoch bola napríklad do väčšiny modelov vyvinutých na plánovanie riadenia odpadového hospodárstva zahrnutá aj recyklácia. Neskoršie modely zahŕňali celý životný cyklus výrobkov. Do tej doby bolo k dispozícii veľmi málo literatúry o podrobných informáciách o nákladoch na integrované systémy odpadového hospodárstva [3].

Novšie prístupy, napríklad od Kijaka a Moya, majú ambíciu dosiahnuť udržateľnejšie nakladanie s odpadom vyvážením sociálnych a ekonomických dopadov na rôznych geografických úrovniach, pričom sociálne náklady predstavujú spoločenské náklady danej politickej iniciatívy [4], [5]. Preto sa na hodnotenie integrovaného riadenia odpadového hospodárstva uplatňuje hodnotenie životného cyklu (LCA). V neskorších rokoch sa LCA používala na optimalizáciu systémov odpadového hospodárstva a identifikáciu environmentálne udržateľných riešení. Napriek tomu sú k dispozícii iba obmedzené informácie na získanie dobrých odhadov nákladov.

V modeloch odpadového hospodárstva je výpočet nákladov viacmenej zahrnutý, aby sa uľahčilo vykonávanie systémov riadenia odpadového hospodárstva. Dôraz sa kladie hlavne na ekonomické výsledky týchto schém, ktorými sa posudzujú napríklad zisky pochádzajúce zo súčasných výnosov a environmentálne výsledky skutočných emisií vyjadrené v peňažnom jednotkách. Analyzujú sa dostupné modely odpadového hospodárstva využívajúce CBA, čo je vhodné, vzhľadom na to, že CBA si vynucuje širší pohľad na subjekty s rozhodovacími právomocami. Táto analýza ukazuje, že v súčasnosti je výpočet finančnej škody na životnom prostredí ako strata prostriedkov počas implementácie systému riadenia a zabezpečenia odpadového hospodárstva. Zobrazujú súčasné škody alebo ako možný pozitívny finančný výsledok pri zmene schém nie je týmito súčasnými modelmi na trhu ponúkaná v explicitnej podobe.

2 LITERÁRNY PREHĽAD/POPIS SÚČASTNEHO STAVU

Mestá pokrývajú asi 3 percentá z povrchu na svete, a napriek tomu produkujú asi 72 percent všetkých globálnych emisií skleníkových plynov. Vzhľadom na ich obrovskú ekologickú stopu musia byť tieto problémy zohľadnené pri navrhovaní riešení klimatickej krízy. Ale môžu? Mestá sú, samozrejme, stvorenia štátnych a národných vlád a ich schopnosti rozvíjať politiky drastického znižovania skleníkových plynov ničiacich klímu sa značne líši v závislosti od ústavného usporiadania, vnútroštátnej politiky a vynaliezavosti miestnych samospráv, podnikov a občanov [6].

Napriek rastúcej pozornosti, ktorá sa venuje novým projektom, existujú závažné otázky týkajúce sa účinnosti koncepcie. Jeho základné princípy pre plánovanie sa nezaoberajú vyváženým, holistickým prístupom k vedeniu rozvoja. Väčšina princípov je úzko zameraná na mestskú obývatel'nosť a zmysel pre miesto, venuje tiež obmedzenú pozornosť ochrane životného prostredia, sociálnej spravodlivosti a ekonomickému rozvoju. Regionálne princípy newurbanizmu sa nevykonávajú v susedských a blokových zásadách. Okrem toho existuje len málo empirických dôkazov o tom, ako dobre sú vlastnosti nového urbanizmu v zmiernovaní dopravných zápch, kvality ovzdušia a vody a dopadov rozvoja na spravodlivosť.

„Trvalo udržateľný rozvoj je proces, v ktorom spoločnosti predvídajú a uspokojujú potreby súčasných i budúcich generácií spôsobom, ktorý reprodukuje a vyvažuje miestne sociálne, ekonomické a ekologické systémy a spája miestne akcie s globálnymi záujmami“ [7].

Aplikácia CBA v modeloch nakladaní s pevným odpadom

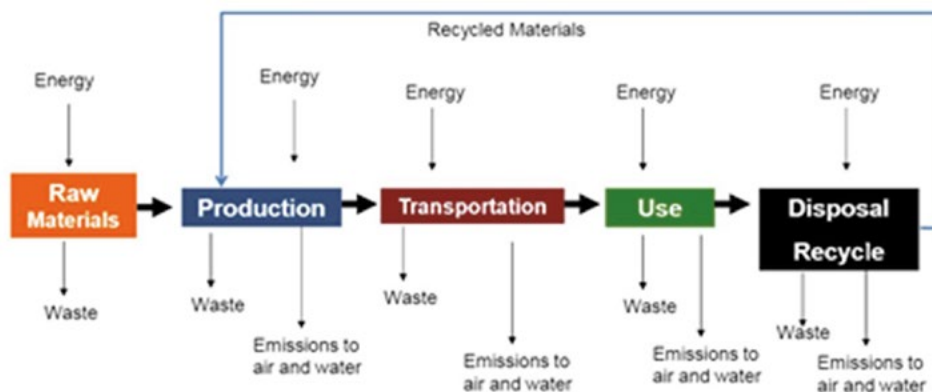
CBA je metodika, ktorá má schopnosť zvládnuť širokú škálu problémov. CBA možno použiť na každé rozhodnutie, ktoré zahŕňa premiestnenie zdrojov v rámci spoločnosti [8].

Medzi hlavné charakteristické znaky CBA, ktoré určujú jeho nevyhnutnosť a dostatočnosť pre aplikáciu na manažment odpadového hospodárstva, sú:

- Rovnomernosť prezentácií, pokiaľ ide o náklady a výsledky;
- Možnosť porovnania alternatívnych variantov s účelom zabezpečenie prijateľného výsledku;
- Flexibilita počas rozhodovacieho procesu z hľadiska spoločnosti hodnoty a priority.

V súčasnosti sú priority v odpadovom hospodárstve [9]:

- Predchádzanie vzniku odpadu.
- Recyklácia a opätovné použitie.
- Optimálne konečné zneškodnenie.
- Možnosť doložiť všeobecne prijateľnú úroveň znečistenie životného prostredia počas procesu zlepšovania kvality.



Obr. 2 LCA cyklus výroby [10].

Prispôsobivosť formy, v ktorej sú výsledky analýzy predložené rozhodovacím orgánom. Znalosti modelov odpadového hospodárstva sú preto menej dostatočné, najmä pre tie modely, ktoré sú zamerané na finančné záležitosti v spoločnosti. Vedecké problémy týkajúce sa modelov odpadového hospodárstva, ktoré sa v súčasnosti používajú na environmentálnom trhu, a spôsobu ich fungovania sú preto:

- Nedostatok nahromadených poznatkov na distribúciu na trh.
- Modely obchodnej správy, ktoré sa dnes používajú, sa nezameriavajú najmä na problematiku odpadového hospodárstva .
- Prevládajúce modely odpadového hospodárstva v súčasnosti nie sú zvyčajne prispôbené na maximalizáciu zisku spoločnosti ani na zlepšenie verejného chápania každodennej reality podnikovej správy, život podnikateľov a súvisiace dôsledky na (hmotné) blaho priemerného občana.

Modely odpadového hospodárstva zvyčajne nemajú k dispozícii nástroje, ktoré by zodpovedali meniacim sa požiadavkám spoločnosti a jej trhových síl, pokiaľ ide o zabezpečenie prijateľnej environmentálnej udržateľnosti jeho elektrárne. Za normálnych okolností pri rozhodovaní zohľadňuje iba ziskovosť. Preto je pravdepodobné, že tradičné modely kontrolných prístrojov nebudú zvládať čoraz prísnejšie environmentálne požiadavky spoločnosti na modely odpadového hospodárstva a ďalšie výrobné jednotky. Vedenie potrebuje nové kontrolné zariadenia, na ktoré sa bude môcť spoľahnúť pri plavbe po obrovskom oceáne čoraz náročnejších právnych predpisov o odpadovom hospodárstve. Všeobecným problémom, ktorý je potrebné vyriešiť, je preto poskytnúť osobe zodpovednej za správu odpadového hospodárstva, modely ktoré budú navrhnuté spôsobom, ktorý je dostatočne flexibilný na to, aby mohol proces spustiť dostatočne efektívne.

3 METODIKA

Analyzované modely

Medzi naj relevantné modely patria:

- WastePlan (Goldstein and Sieber, 2003)
- IWM-2 (McDougall et al, 2001)
- WISARD (PWC and URS, 2001)
- EPIC/CSR Model (EPIC & CSR, 2000)
- MSW-DST (Solano et al, 2002a, Solano et al, 2002b)
- EUGENE (Berger et al, 1998)
- ORWARE (Eriksson, 2000, Björklund, 2000)
- MARKAL (Gielen, 1998)
- MWS (Ljunggren, 1997, Ljunggren, 1998)

Počítačové modely nakladania s odpadom sú typickými príkladmi modernej aplikovanej výskumnej práce, ktorú je možné použiť na podporu integrovaného environmentálne - ekonomicky efektívneho administratívneho rozhodovania v oblasti odpadového hospodárstva. Objektívnosť týchto modelov závisí od ich adekvátnosti s ohľadom na:

- ciele a úlohy praxe riadenia v skutočnosti,
- výberové kritériá najúčinnejších investičných projektov,
- aspekty rozvoja environmentálnych politík,
- účelné programy a obchodné plány,
- etapy opodstatnenia určitých opatrení v odpadovom hospodárstve.

Modely odpadového hospodárstva vyvinuté pomocou týchto piatich kritérií a informácií týkajúcich sa modelovania rozhodovania sú uvedené vyššie.

4 VÝSLEDKY

Analýza dostupných modelov nakladania s odpadom pomocou CBA ukázala, že v súčasnosti je výpočet finančnej škody na životnom prostredí ako strata prostriedkov počas implementácie schémy odpadového hospodárstva komplikovaná.

Zobrazenie škody alebo možný pozitívny finančný výsledok na zmeny schémy modelu nedokážu tieto prevládajúce modely ponúknuť v explicitnej podobe.

V tabuľke na Obr. 3 sú uvedené jednotlivé modely spolu z porovnávanými parametrami.

Model	Spoločné náklady a odhadujúce				Hlavné náklady			Riešenie environmentálnych otázok					Predpokladané pozitívne účinky modelu v analýze						
	Recykliácia	Erгодické zhodnotenie	Kompostovanie	Skladovanie	Celkové náklady na predaj	Investičné náklady	Model úložných nákladov	Znečistenie vody	Znečistenie vzduchu	Znečistenie pôdy	Prírodná obnovu odpadov	Fluktuácia spotreby zlova	Výdavky na pracovné zdroje	CBA	LCCA	Hierarchická bilancia	CI životná analýza	Minimálna náklady	Mas malá výnos
WastePlan	•	•		•	•			•	•		•	•	•				•	•	
IWM-2	•	•	•		•		•	•	•							•			
WISARD	•	•	•		•			•	•	•				•		•			
EPIC/CSR Model	•	•	•		•			•	•						•				
MSW ISI	•	•	•		•			•	•			•		•					•
EUGENE	•					•	•	•	•										•
ORWARE		•	•			•		•	•	•		•			•				
MARKAI	•	•			•	•			•			•							•
MWS	•	•	•		•				•	•	•								•

Obr. 3 Porovnanie modelov odpadového hospodárstva.

5 DISKUSIA

Ekonomika odpadového hospodárstva, najmä jej nákladové aspekty, sú jednoznačne spojené so životným prostredím a zdravím, a to ako z podnikového tak aj spoločenského hľadiska. Na túto tému však nie je možné nájsť veľa literatúry [11]. Vedci napriek tomu preukázali zrejmy vzťah medzi stratégiami priemyselnej preventívnej ochrany životného prostredia a značnými úsporami spoločnosti [12]. Ukázalo sa, že efektívne nakladanie s priemyselným odpadom zvyšuje konkurencieschopnosť firmy.

Ako začleniť rôzne typy hodnôt bolo témou diskusie. Niektorí odborníci sa domnievajú, že CBA by sa malo robiť so spoločnými nákladmi a prínosmi vyčíslenými v peňažných jednotkách. Argumentom pre použitie speňažených hodnôt je, že to uľahčuje osobe s rozhodovacou právomocou monitorovať projekt, ako keď sú kvalitatívne informácie uvedené v iných jednotkách. Niektoré štúdie tvrdia, že kvalitatívne informácie o environmentálnych hodnotách majú menšiu váhu a je preto pravdepodobné, že budú ignorované alebo vylúčené. Pokúšať sa redukovať všetko na peňažné jednotky znamená veľké pochopenie projektu alebo by na druhej strane mohli stratiť zmysel rozhodnutia.

Tieto vedecké problémy, ktoré sa tu spomínajú, znamenajú značný potenciál pre uskutočnenie výskumu týkajúceho sa modelovania odpadového hospodárstva. Cieľom budúceho výskumu je akumulácia vedomostí a kompetencií v rámci „priemyselnej environmentálnej ekonomiky“, aby sa zlepšilo životné prostredie a zisky spoločností v tomto poradí.

6 ZÁVER

Výskumné práce ukázali dostatočné povedomie o implementovaní manažmentu odpadového hospodárstva za pomoci modelov používaných pri hodnotení projektov pomocou CBA.

Ako jeden z najobjektívnejších modelov patrí model WastePlan, ktorý bol publikovaný v roku 2003 autormi Goldstein a Sieber. Tento model upravuje postupy hodnotenia odpadového hospodárstva v rámci analýzy zisku a strát, ktoré napomáhajú k jednoduchšiemu a objektívnemu hodnoteniu projektov v rámci súťaží. Model pokrýva všetky formy spracovania odpadu a jeho prípadné formy ekonomického využitia ale zaoberá sa aj hodnotením produkcie odpadov ako takých a ich dopadov na životné prostredie.

Podakovanie

Tento článok bol vytvorený s podporou projektu FAST-S-20-6383 Vybraná ekonomicko-manažerská hľadiska ve stavebníctví.

Použitá zdroje

- [1] Roberge, H.D. & Baetz, B.W., 1994. Optimization modelling for industrial waste reduction planning. In *Waste Management*, pp. 35-48. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0956053X94900191>.
- [2] Gottinger, H.-W., 1991. *Economic Models and Applications of Solid Waste Management*. In London: Gordon and Breach Science Publishers.
- [3] Morrissey, A.J. & Browne, J., 2004. Waste management models and their application to sustainable waste management. *Waste Management*, 24(3), pp.297-308. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X03001818>.
- [4] Kijak, R. & Moy, D., 2004. A Decision Support Framework for Sustainable Waste Management. *Journal of Industrial Ecology*, 8(3), pp.33-50. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1162/1088198042442306>.
- [5] Vigso, D., 2016. Deposits on single use containers - a social cost-benefit analysis of the Danish deposit system for single use drink containers. , 22(6), pp.477-487. Available at: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X04049252>.
- [6] Fitzgerald, J., 2020. *Greenovation: Urban Leadership on Climate Change 1st ed.*, New York: Oxford University Press.
- [7] Berke, P.R. & Conroy, M.M., 2000. Are We Planning for Sustainable Development? In *Journal of the American Planning Association*. pp. 21-33. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01944360008976081>.
- [8] Carolus, J.F. et al., 2018. A Bottom-up Approach to Environmental Cost-Benefit Analysis. *Ecological Economics*, 152, pp.282-295. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921800918303598>.
- [9] Moutavtchi, V. et al., 2010. Solid waste management by application of the WAMED model. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 12(2), pp.169-183. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10163-009-0285-x>.
- [10] Pelletier, N. & Tyedmers, P., 2008. Life Cycle Considerations for Improving Sustainability Assessments in Seafood Awareness Campaigns. *Environmental Management*, 42(5), pp.918-931. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s00267-008-9148-9>.
- [11] Pearce, D.W. & Brisson, I., 2007. The economics of waste management. *Waste Treatment and Disposal*, pp.131-152. Available at: <http://ebook.rsc.org/?DOI=10.1039/9781847552334-00131>.
- [12] Lidgren, K., 1993. *Industriell miljöekonomi (Industrial environmental economics): Liber-Hermods (in Swedish)*.

ENVIRONMENTÁLNÍ CERTIFIKACE BUDOV – SITUACE V ČESKÉ REPUBLICE

ENVIRONMENTAL CERTIFICATION OF BUILDINGS – THE SITUATION IN THE CZECH REPUBLIC

Zuzana Mrňová*¹, Alena Tichá¹

*zuzka.mrnova@seznam.cz

¹ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební ekonomiky a řízení, Veveří 331/95, Brno, 602 00, Česká republika

Abstrakt

Zodpovědný přístup k životnímu prostředí se netýká pouze podnikové ekologie, ale stále častěji se promítá i do oblasti projektování a výstavby stavebních objektů, s čímž úzce souvisí pojem udržitelná výstavba budov. S rozvojem udržitelné výstavby vyvstala potřeba hodnocení budov a jejich dopadů na životní prostředí. Z tohoto důvodu byly vytvořeny environmentální certifikace budov, které hodnotí to, jak budova ovlivňuje své okolí v průběhu životního cyklu.

Cílem tohoto článku je zjistit, jaké environmentální certifikace ve světě existují, a které z nich se používají v České republice nejčastěji. Na závěr jsou certifikace porovnány a popsány jejich hlavní rozdíly.

Klíčová slova

Environmentální certifikace budov, LEED, BREEAM, WELL, SBTOOLCZ

Abstract

A responsible approach to the environment is not only related to corporate ecology, but is also increasingly reflected in the design and construction of buildings, which is closely related to the concept of sustainable construction of buildings. With the development of sustainable construction, the need arose to evaluate buildings and their impact on the environment. For this reason, environmental certifications of buildings have been developed, which assess how a building affects its surroundings during its life cycle.

The aim of this article is to find out which environmental certifications exist in the world and which of them are most often used in the Czech Republic. Finally, the certifications are compared and their main differences are described.

Key words

Environmental certification of buildings, LEED, BREEAM, WELL, SBTOOLCZ

1 ÚVOD

S rozvojem udržitelné výstavby, která se opírá o tři hlavní pilíře udržitelnosti (kvalita životního prostředí, sociální a kulturní aspekty a ekonomická efektivita), vznikla potřeba hodnotit budovy a jejich dopady na životní prostředí. Při hodnocení budov z hlediska udržitelné výstavby ovšem nelze využívat pouze kritéria jako je například energetická náročnost, spotřeba primárních energií či produkce CO₂. Je nutné posuzovat budovu v rámci celého životního cyklu, což znamená od způsobu získávání materiálů pro výstavbu až po samotnou likvidaci budovy. Z čehož vyplývá, že v hodnotícím procesu musí být sledována kritéria jako je spotřeba vody v průběhu celého životního cyklu, způsob nakládání s odpady, jaké vytváří budova podmínky pro zdravé vnitřní prostředí, potažmo jak budova uspokojuje životní potřeby svých uživatelů (dopravní dostupnost, kvalita místa apod.).

S hodnocením budov z hlediska udržitelné výstavby pak úzce souvisí environmentální certifikace, které byly v 90. letech 20. století vytvořeny pro snadnější vzájemné porovnání budov a jejich dopadů na životní prostředí. Environmentální certifikace hodnotí především to, jak budova ovlivňuje své okolí v průběhu celého životního cyklu. Současně také hodnotí, jakou kvalitu budova poskytuje svým uživatelům [1].

Nyní ve světě existuje velké množství certifikačních nástrojů a téměř v každém státě se používá odlišná hodnotící metodika. V některých státech včetně České republiky se dokonce používá více metodik certifikace, které si vzájemně konkurují. Především kvůli tomu pak vzniká v oblasti environmentální certifikace nepřehledná

situace a zatím to nevypadá, že by v neblíží době mohlo dojít ke sjednocení těchto hodnotících nástrojů. Cílem tohoto článku je proto porovnání environmentálních certifikací používaných v České republice.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Environmentální certifikaci budov lze chápat jako nezávislý audit, který hodnotí budovy v různých fázích jejich životního cyklu. Její hlavní funkcí je tedy poskytování transparentního důkazu o kvalitě dané budovy. Dále lze environmentální certifikace využít pro vzájemné porovnání budov z hlediska jejich dopadů na životní prostředí [2], [3], [4].

Environmentální certifikaci lze udělit jak stávající budově, tak i budově nové. Avšak tyto certifikace se od sebe vzájemně liší. Rozdíl je zejména v tom, že u nové budovy je ovlivňován a kontrolován především návrh budovy a následující proces výstavby. U již existující budovy se certifikace zaměřuje pouze na samotné procesy v budově. Z výše uvedeného tedy vyplývá, že snáze lze získat certifikát pro budovu v přípravné fázi než pro již existující budovu. U budovy, která je ve výstavbě, lze totiž ještě ovlivnit či změnit spoustu parametrů, které jsou při certifikaci hodnoceny. Lze například navrhnout ekologický zdroj vytápění či využít kvalitnější a lokální materiály při výstavbě. Druhým podstatným rozdílem je také to, že v případě, kdy je budova certifikována již při návrhu, environmentální certifikace platí po celou dobu životnosti budovy. V případě již existující budovy je však nutné environmentální certifikaci v daných časových horizontech obnovovat [1].

Jak už bylo výše řečeno ve světě nyní existuje velké množství environmentálních certifikací, a proto budou níže popsány čtyři certifikační programy, se kterými se lze setkat v České republice. Jedná se o americký LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), WELL (WELL Building Standard), britský BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) a český národní certifikační program SBToolCZ, který vychází z mezinárodní metodiky SBTool (Sustainable Building Tool).

Certifikát LEED – Leadership in Energy and Environmental Design

Environmentální certifikát LEED vznikl v roce 1998 v USA, kde jej vyvinula Americká rada pro šetrné budovy (U.S. Green Building Council, USGBC). Od svého vzniku získalo certifikát LEED více než 100 000 projektů či stávajících budov ve 164 zemích světa. Celkově tyto certifikované budovy pokrývají 1 280 km² dotčených ploch [2].

LEED je stejně jako ostatní environmentální certifikace využíván pro nezávislé ověření, zda byla budova či komplex budov navržen a postaven za pomoci postupů a strategií cílených na dosahování vysokých požadavků v oblastech zdravého životního prostředí. Toto ověření je prováděno pomocí hodnotícího procesu, v rámci kterého je bodově ohodnoceno 7 kategorií (udržitelný rozvoj území, hospodaření s vodou, energie a ovzduší, materiály a zdroje, kvalita vnitřního prostředí, inovace a regionální priority). Poté co jsou přiděleny body v rámci jednotlivých kategorií, je na základě celkového počtu bodů udělen certifikát příslušné úrovně (Certifikováno, Stříbrný, Zlatý či Platinový certifikát). Maximálně lze získat 100 bodů + 10 bonusových bodů za dodatečné kategorie Inovace (6 bodů) a Regionální priority (4 body).

Certifikát BREEAM – Building Research Establishment Environmental Assessment Method

Britský certifikát BREEAM je světově nejrozšířenější systém využíván pro hodnocení vlivu staveb na životní prostředí. Nejinak je tomu i v České republice, kde je také nejpoužívanějším certifikačním systémem. Od svého založení roku 1990 BREEAM certifikát obdrželo již více než 560 000 staveb v 77 zemích světa a přes dva miliony projektů je zaregistrováno [2].

BREEAM se zaměřuje opět na udržitelnost při návrhu budov a popisuje vliv budov na životní prostředí. V hodnotícím procesu je posuzováno 10 kategorií podle jejich vlivu na životní prostředí (energie, zdraví a vnitřní prostředí, materiály, management, znečištění, využití půdy a ekologie, doprava, odpad, voda, inovace). Jednotlivé kategorie v sobě dále zahrnují podkategorie, na základě kterých je budova hodnocena. Výše získaných kreditů se pak odvíjí od kvality splnění požadavků kladených jednotlivými podkategoriemi. Získané kredity se v kategorii sečtou a přenásobí se vahou na procenta. Na závěr hodnotícího procesu je zjištěno výsledné skóre, které je převedeno na celkové hodnocení, na jehož základě je udělen certifikát BREEAM podle příslušné úrovně (Vyhovující, Dobrá, Velmi dobrá, Výborná a Mimořádná úroveň) [5], [6].

Certifikát WELL – WELL Building Standard

Jedná se o jeden z nově vzniklých certifikačních nástrojů, který je prozatím používán ve 32 zemích světa a do května roku 2018 získalo tento certifikát 175 budov či projektů. Například v České republice je zatím pouze jedna budova, která získala certifikát WELL na úrovni Gold. Jedná se o kancelářskou budovu Visionary nacházející se v Praze-Holešovicích [1], [2].

Certifikát WELL se na rozdíl od ostatních zde uvedených certifikací používá pro certifikaci vnitřních prostor. Umožňuje posuzovat kvalitu vnitřního prostředí zejména z pohledu budoucích uživatelů, tzn. WELL certifikace by měla garantovat příjemné pracovní prostředí.

V rámci certifikace WELL je hodnoceno 7 základních okruhů (vzduch, voda, výživa, světlo, fitness, komfort a mysl). V těchto základních okruzích jsou obodovány jednotlivé předpoklady, v rámci kterých je 40 povinných (požadované minimum) a 60 je volitelných a jejich výběr závisí na možnostech daného projektu a následně určuje stupeň certifikace (WELL SILVER, WELL GOLD, WELL PLATINUM) [1], [3].

Certifikát SBToolCZ – Sustainable Building Tool CZ

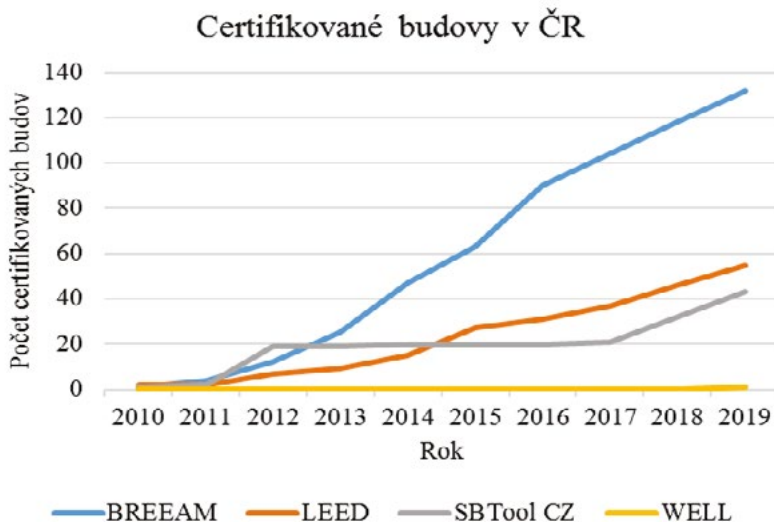
SBToolCZ je český certifikační systém používaný pro hodnocení komplexní kvality budov, v rámci kterého se posuzují vlastnosti budovy a jejího okolí s ohledem na splnění požadavků udržitelné výstavby. Tento český systém vychází z mezinárodního schématu SBTool – Sustainable Building Tool. Na jeho vývoji se podílela i Fakulta stavební ČVUT v Praze. Díky tomu, že se jedná o národní systém je v něm zohledněno prostředí českého stavebnictví. Což znamená, že při certifikaci je zohledňována česká legislativa a normy, hodnocená kritéria jsou pro Českou republiku relevantní, srovnávací hladiny jsou nastaveny podle českého stavebnictví, váhy v metodice jsou nastaveny českým panelem expertů a zohledňují prioritu zájmu hodnocení v České republice. [1], [7].

Mezi základní cíle systému SBToolCZ se řadí především podpora snižování energetické náročnosti budov, zmírnění dopadu staveb na životní prostředí v průběhu celého životního cyklu, podpora vytvoření zdravého vnitřního prostředí budov a zhodnocení budov v rámci dalších aspektů v oblasti udržitelné výstavby [8].

V hodnotícím procesu je zohledňováno velké množství kritérií rozdělených do třech základních skupin (environmentální kritéria, sociální kritéria, ekonomika a management). Tyto tři základní skupiny jsou dále doplněny čtvrtou skupinou, která se zabývá lokalitou, ve které se daná budova nachází. Ovšem tato skupina se hodnotí, ale nevstupuje do výsledného certifikátu kvality. Jednotlivá kritéria jsou bodována podle metodických postupů a výsledné body ze všech kritérií se následně přenásobí váhami. Vážené body jednotlivých kritérií se sečtou a vznikne tak celkový výsledek (v rozsahu 0 až 10 bodů), na jehož základě je přiřazen příslušný certifikát (Certifikováno, Bronzový, Stříbrný a Zlatý certifikát kvality) [1], [9].

3 METODIKA

Pro zjištění, které environmentální certifikace jsou v České republice používány nejčastěji, byla použita data z výroční tiskové konference Šance pro budovy ze září roku 2019. K tomuto datu bylo v České republice celkově 205 certifikovaných budov. Největší zastoupení měl certifikát BREEAM, a to celkově u 122 budov. Druhým nejpoužívanějším certifikátem byl LEED s 50 certifikovanými budovami. Na třetím místě byl poté národní certifikační nástroj SBToolCZ, kterým disponovalo 32 budov. Od roku 2019 lze v České republice nalézt také jednu budovu s certifikátem WELL (Obr. 1).



Obr. 1 Vývoj počtu certifikovaných budov v České republice [10].

4 VÝSLEDKY

Jak vyplývá z výše uvedeného, v České republice se používají současně 4 environmentální certifikace, a to BREEAM, LEED, WELL a SBToolCZ, a proto bylo provedeno jejich vzájemné porovnání.

Zmíněné čtyři environmentální certifikace jsou si do značné míry podobné, jelikož jsou používány pro obdobný účel. Tím je poskytnutí návodu k vytvoření budovy, která bude šetrná k životnímu prostředí a zároveň zajistí kvalitní vnitřní prostředí pro osoby vyskytující se v budově. Tyto certifikační systémy mají ještě jednu společnou vlastnost. Využívají pro hodnocení budov metody založené na multikriteriální analýze. Což znamená, že je hodnoceno velké množství kritérií, která se často pomocí váhového vektoru spojují do jednoho výsledného ukazatele, na základě kterého je udělen certifikát. Počet hodnocených kritérií se liší v závislosti na druhu certifikačního systému, ale i přestože je každý systém jiný, lze v nich nalézt mnoho stejných či podobných hodnocených aspektů.

Hlavním cílem všech blíže popsaných certifikací, kromě certifikace WELL, je tedy posouzení vlivu staveb na životní prostředí. Certifikace hodnotí obdobné kategorie jako je hospodaření s vodou, energie a ovzduší, kvalita vnitřního prostředí, nakládání s odpady, kvalita použitých materiálů při výstavbě budovy atd. Stěžejní rozdíl je proto zejména ve způsobu výpočtu bodového ohodnocení. Certifikace BREEAM jednotlivé kategorie hodnotí váženými procentními body, naopak certifikace LEED kategorie hodnotí pomocí bodů. Česká certifikace SBToolCZ se dále odlišuje tím, že výsledné body v jednotlivých kategoriích přenásobí váhami a tyto vážené body se na konci sečtou a tím se získá celkový výsledek na jehož základě je následně vydán příslušný certifikát kvality. Certifikace SBToolCZ se ještě odlišuje tím, že ji lze využít pouze v České republice, jelikož kritéria hodnocení jsou přizpůsobena přírodním podmínkám a legislativě České republiky.

Jiným typem certifikace je certifikát WELL, který se zaměřuje zejména na posouzení kvality vnitřního prostředí z pohledu budoucích uživatelů. Což znamená, že WELL certifikace by měla garantovat příjemné pracovní prostředí. V rámci hodnocení jsou jednotlivé kategorie, stejně jako v případě certifikace LEED, ohodnoceny bodově [1].

Podrobnější porovnání environmentálních certifikací (WELL, BREEAM, LEED a SBToolCZ) je pro přehlednost uvedeno v následující tabulce (Obr. 2).

Název certifikace	LEED	BREEAM	SBTOOLCZ	WELL
Rok založení	1998	1990	2010	2014
Místo vzniku	USA	Velká Británie	Česká republika	USA
Význam	mezinárodní	mezinárodní	národní	mezinárodní
Hlavní zaměření	dopady budov na životní prostředí	dopady budov na životní prostředí	dopady budov na životní prostředí	zdravé vnitřní prostředí budov
HODNOTÍCÍ PROCES				
a) Způsob hodnocení	bodové	vážená procenta	vážené body	bodové
b) Max. počet bodů/procent	100 bodů + 10 bonusových bodů za inovace a regionální priority	100 %	10 bodů	100 bodů + 10 bonusových bodů za inovace
c) Počet hodnocených kategorií	7	10	3 + 1	7
d) Hodnocené kategorie	energie a ovzduší (37 b.)	energie (19 %)	environmentální kritéria	voda (8 b.)
		znečištění (10 %)		vzduch (29 b.)
	materiály a zdroje (13 b.)	materiály (12,5 %)		výživa (15 b.)
		odpad (7,5 %)		světo (11 b.)
	hospodaření s vodou (10 b.)	voda (6 %)		fitness (8 b.)
	kvalita vnitřního prostředí (12 b.)	zdraví a vnitřní prostředí (15 %)		sociální kritéria
	udržitelný rozvoj území (28 b.)	doprava (8 %)	ekonomika a management	mysl (18 b.)
			lokality (nevstupuje do výsledného certifikátu)	
		inovace (6 b.)	inovace (6 %)	
	regionální priority (4 b.)	management (12 %)		
e) Nejvýše hodnocená kategorie	energie a ovzduší	energie	spotřeba primární energie	vzduch

Obr. 2 Porovnání environmentálních certifikací [1].

5 ZÁVĚR

Environmentální certifikace zažívají velký rozvoj, což potvrzuje situace na trhu s nemovitostmi, zejména pak na kancelářském trhu, kde přestává být slovní spojení environmentální certifikace ojedinělé, a naopak se stává samozřejmostí. Především ze strany nájemců je vytvářen tlak na investory či vlastníky administrativních budov, jelikož nájemci mají zájem o budovy šetrné k životnímu prostředí, budovy s příjemným vnitřním prostředím, s dobrou dopravní dostupností a s nízkými provozními náklady. Investoři či vlastníci administrativních budov jsou proto nuceni na tuto situaci reagovat a dochází tak k nárůstu počtu certifikovaných administrativních budov. V této souvislosti tak vyvstává otázka, která certifikace je nevhodnější. Obecně se dá říci, že jako doklad potvrzující šetrnost budovy k životnímu prostředí, jsou nevhodnější certifikáty BREEAM a LEED, případně SBToolCZ. Ovšem tím, že SBToolCZ je pouze národní certifikační nástroj, není tak atraktivní pro zahraniční investory, respektive zahraniční nájemce kancelářských prostor, kteří preferují právě mezinárodní certifikace. Toto tvrzení potvrzují i data z roku 2019, kdy žádná budova nebyla certifikována národním certifikátem SBToolCZ. Certifikát WELL lze poté doporučit zejména v těch případech, kdy má být prokázána kvalita vnitřního prostředí pro budoucí uživatele budovy.

Závěrem lze konstatovat, že environmentální certifikace jsou dobrým nástrojem, kterým lze veřejnosti a potenciálním zákazníkům sdělit, že je budova kvalitní a byla postavena v souladu se zásadami udržitelné výstavby.

Poděkování

Tento článek byl vypracován v rámci projektu specifického výzkumu na Vysokém učení technickém v Brně č. FAST-J-20-6344 Environmentální certifikace budov – situace v České republice.

Použitá zdroje

- [1] MRŇOVÁ, Z. Vliv environmentální certifikace budov při oceňování s ohledem na životní cyklus stavby. Brno, 2020. 91 s., 50 s. příl. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/120312>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, Odbor znalectví ve stavebnictví a oceňování nemovitostí. Vedoucí práce Ing. Milada Komosná, Ph.D.

- [2] JENSEN, K. G. et al. Guide to Sustainable Building Certifications [online]. SBi and GXN, 2018, ISBN 978-87-563-1881-5. Dostupné z: <https://gxn.3xn.com/wp-content/uploads/sites/4/2018/08/Guide-to-Green-Building-Certifications-August-2018-weblow-res.pdf>
- [3] MRŇOVÁ, Zuzana a Alena TICHÁ. Environmentální certifikace budov a její vliv na provozní náklady. In: Sborník příspěvků konference Junior Forensic Science Brno 2019 [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, Purkyňova 464/118, 612 00 Brno, 2019 [cit. 2020-05-02]. ISBN 978-80-214-5730-0. Dostupné z: http://www.jufos.cz/wp-content/uploads/2015/11/Sborn%C3%ADk-JUFOS-2019_final.pdf
- [4] VOLNÝ, Martin. Certifikace budov – oblasti hodnocení a výhody. In: O Energetice [online]. 01.05.2015 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/certifikace-budov-oblasti-hodnoceni-a-vyhody>
- [5] How BREEAM Certification Works. In: BREEAM [online]. [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.breeam.com/discover/how-breeam-certification-works/>
- [6] BREEAM UK New Construction: Non-domestic Buildings [online]. 2019 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: https://www.breeam.com/NC2018/content/resources/output/10_pdf/a4_pdf/print/nc_uk_a4_print_mono/nc_uk_a4_print_mono.pdf
- [7] VONKA, Martin. A19 – Úvod do problematiky: environmentální hodnocení a certifikace budov dle principů trvale udržitelné výstavby [online]. Brno: Národní stavební centrum s.r.o., Bauerova 491/10, 603 00 Brno, 2012 [cit. 2020-05-02]. ISBN 978-80-87665-18-3. Dostupné z: <http://www.stavebnicentrum.cz/wp-content/uploads/2018/10/vzdelavani-a19.pdf>
- [8] O SBToolCZ. In: SBToolCZ: Národní nástroj pro certifikaci kvality budov [online]. 18.10.2018 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.sbtool.cz/cs/o-sbtoolcz>
- [9] Metodika SBToolCZ. In: SBToolCZ: Národní nástroj pro certifikaci kvality budov [online]. 18.10.2018 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.sbtool.cz/cs/metodika>
- [10] HOLUB, Petr. Výroční tisková konference Šance pro budovy. In: Šance pro budovy [online]. [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: https://sanceprobudovy.cz/wp-content/uploads/2019/05/vyrocn%C3%AD-tiskovka_spb_2019-2.pdf

KOMPLEXNÍ ANALÝZA TRHU S DŘEVOSTAVBAMI

COMPLEX WOOD BASED HOUSES MARKET ANALYSIS

Tomáš Hrdlička ^{*,1}

*hrdlicka.tomas@usi.vutbr.cz

¹Ústav soudního inženýrství VUT v Brně, Purkyňova 464/11, Brno 612 00

Abstrakt

Rodinné domy patří k nejčtenější výstavbě budov v České republice. Za rok 2019 bylo dokončeno 18 390 rodinných domů. Podíl na výstavbě z hlediska materiálové báze je 83,1 % pro zděné rodinné domy a 14,9 % pro dřevostavby. Na sestavené databázi 1 520 nabídek na typové rodinné domy na klíč jsou zhodnoceny základní faktory ovlivňující cenu stavby. Z toho je odvozena podoba průměrného rodinného domu. Ten má průměrnou velikost 112 m² užitné plochy, jedná se o přízemní rodinný dům se šikmou střechou. Vytápění je pomocí elektriny a to pomocí radiátorů nebo přímotopů. Z hlediska materiálové báze se jedná o zděnou stavbu s dodatečným zateplením. Současně byla provedena analýza trhu s rodinnými domy v oblasti Brno-venkov. Analýza ukazuje, že podíl prodaných dřevostaveb v období 2017–2020 v okrese Brno-venkov je 1,3 %.

Klíčová slova

Rodinné domy, náklady, analýza trhu, dřevostavby, zděné domy

Abstract

It was finished 18 390 houses in the Czech Republic. Houses are the most frequent finished type of buildings. The share of construction of brick houses is 83.1% and for wood-base houses its 14.9%. Database of 1520 bids for houses was completed and how what is typical Czech house. It is single floor brick house with sloped roof. The heating system is compiled by electric heater and radiators. Also house market analysis was made. 631 sold houses was examined in the period 2017-2020 in Brno-venkov district, Czech Republic. Only 1.3% wood-based houses was detected.

Key words

Houses, cost, market analysis, wood-based houses, brick houses

1 ÚVOD

Rodinné domy patří ze statistického hlediska k nejčteněji dokončovaným stavbám. V roce 2019 jich bylo dokončeno 18 390. [1] Z hlediska technologie výstavby, resp. dle materiálů, lze rodinné domy rozlišit na dřevostavby a rodinné domy zděné. Podíl dřevostaveb byl v roce 2019 v České republice 14,9 % z celkové výstavby rodinných domů [1]. Tento podíl má rostoucí trend, což potvrzuje zájem o výstavbu dřevostaveb.

Pro účel článku je za dřevostavbu považován takový rodinný dům, který vyhovuje následující definici. „Pojmem dřevostavba rozumíme takovou stavbu, která pro svou nosnou konstrukci, zajišťující přenos zatížení a celkovou prostorovou tuhost a integritu, využívá v převážné míře dřevo a materiály na jeho bázi“ [2]. Zároveň je třeba vnímat dřevostavby v tomto kontextu jako konstrukce splňující současně požadavky na konstrukce. Tak jak uvádí Lenoch & Hlaváčková [3], dřevostavby mají na území České republiky bohatou tradici, od tradičních roubenek, po rodinné domy typu OKAL.

Cílem příspěvku je provést kompletní analýzu trhu s rodinnými domy a to trhu s již realizovanými domy, tak trhu s dodávkami rodinných domů na klíč (novostavby).

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED

Vzhledem k charakteru řešené problematiky nejsou k dispozici obdobné analýzy na zahraničních trzích, které by byly zpracovány detailně. Nejčastěji se informace ve vědeckých člancích omezí na podíl výstavby dřevostaveb. Například v Německu se jedná o podíl 15 % dřevostaveb [4], na Slovensku se pak jedná o podíl menší jak 10 % [5].

Porovnání nabídek dřevostaveb a zděných rodinných domů se věnoval Lenoch & Kalousek [6], ve své publikaci uvádí rozdíly v cenách rodinných domů na klíč po přepočtu na m². Jednotkové ceny dřevostaveb jsou nižší v kategorii rodinných domů dle obestavěného prostoru 401–600 m³, 601–800 m³, 801–1 000 m³ a nad 1 000 m³. Naopak ve velikostní kategorii do 400 m³ jsou dřevostavby mírně dražší. Prokop provedl detailní analýzu trhu dřevostaveb z hlediska nákladů v závislosti na konstrukční variantě dřevostaveb. Potvrzuje v oceňovací praxi zažité pravidlo, že cena za zvolenou jednotku klesá v závislosti se zvyšující velikostí stavby. Zároveň je z publikovaných grafů patrná nevhodnost používání jednoho rozpočtového ukazatele pro všechny typy dřevostaveb, bez rozlišení velikosti a konstrukčního systému [7].

Dále se nepřímo problematikou zabýval také Lenoch & Hlaváčková [3], kteří realizovali průzkum charakteristického profilu uživatelů dřevostaveb v období 2012–2014. Na celkovém vzorku 1 000 respondentů, ve všech krajích České republiky bylo provedeno dotazníkové šetření. Z šetření vyplývá, že majitelé (resp. investoři) dřevostaveb se významně neliší od stavebníků zděných rodinných domů (věkem, vzděláním, pohlavím).

Z hlediska prováděné analýzy trhu jsou také relevantní informace Českého statistického úřadu, který eviduje počet dokončených rodinných domů dle třídy energetické náročnosti budovy [1]. V roce 2019 se jednalo o 7 % dokončených rodinných domů v kategorii A, 65 % v kategorii B a 28 % v kategorii C. Dále jsou evidovány informace o materiálové bázi stavby, resp. materiálové bázi svislé nosné konstrukce. V roce 2019 se jednalo o dřevostavby v již zmíněných 14,9 %, kdy k převládající konstrukci patří lehký skelet, a to jak staveništní montáž, tak panelová montáž. 83,1 % rodinných domů bylo dokončeno zděnou technologií, bez dalšího rozlišení. Pouze 1,2 % všech rodinných domů, tj. 216 ks, bylo realizováno montážní technologií (betonové panely, bez započtení panelů CLT). Zbývajících 0,7 % je pak realizováno jinou, blíže nespecifikovanou technologií.

Dále je Českým statistickým úřadem sledována průměrná velikost rodinného domu, za rok 2019 je to 133 m² užitné plochy a průměrná cena za m² užitné plochy. Pro rok ČSÚ uvádí 26,6 tis vč. DPH [1].

3 METODIKA

Zkoumaná databáze je sestavena z 1 520 nabídek na výstavbu rodinných domů. Celkově je do databáze zahrnuta nabídka 38 společností zabývajících se výstavbou typových rodinných domů. Společnosti jsou vybrány náhodně, jedná se tak o stavební společnosti různé velikosti a kapacity. Ve většině případů byla zahrnuta kompletní nabídka společnosti, v případně nadměrné nabídky společnosti je zahrnutý stejný počet přízemí a více podlažních rodinných domů, stejně jako staveb do 100 m² a nad 100 m² podlahové plochy.

Zahrnuty jsou pouze kompletní nabídky na výstavbu rodinných domů na klíč, u kterých je možné rozlišit specifikaci stavby. Z důvodu porovnatelnosti užitných parametrů staveb jsou zahrnuty stavby pouze v podobném energetickém standardu. Vyloučeny tak jsou energeticky pasivní či aktivní domy. Vzhledem k nízké výstavbě rodinných domů z CLT panelů, roubenek a srubů nejsou tyto technologie zohledněny v sestavené databázi.

Současně byl v rámci souběžného výzkumu (č. FAST/ÚSI-J-20-6366) sledován realitní trh s rodinnými domy v lokalitě Brno-venkov. Data o nabídkách a prodeích rodinných domů byly sledovány od března 2017 do srpna 2020. Za toto období byla sestavena databáze obsahující 631 záznamů o prodeji rodinných domů. Krom materiálové báze byly sledovány základní cenotvorné faktory.

4 VÝSLEDKY

Následující výsledky vychází z databáze nabídek na výstavbu rodinných domů na klíč.

Materiálová báze stavby

V databázi je rozlišováno mezi dřevostavbou a zděnou stavbou. U zděných staveb je nabídka citelněji slabší, neb řada stavebních společností nabízí pouze individuální výstavbu, bez nabídky typových rodinných domů.

Tab. 1 Zastoupení RD dle materiálové báze v databázi.

Sledovaný faktor	Počet výskytů	Podíl v %
Dřevostavba	946	62 %
Zděný RD	574	38 %
Celkem	1 520	100 %

Technologie výstavby – dřevostavby

Dále pro 946 dřevostaveb byl sledován technologický postup výstavby.

Tab. 2 Zastoupení dřevostaveb dle technologie výstavby v databázi.

Sledovaný faktor	Počet výskytů	Podíl v %
Staveništní montáž	468	49 %
Panelová montáž	478	51 %
Celkem	946	100 %

Technologie výstavby – zděné rodinné domy

Pro zděné domy je sledována skladba stěny. Jednovrstvé zdivo bylo převážně pórobetonu, tl. 400 mm a více. U vícevrstvého zdiva převládalo zateplení polystyrenem. To lze vysvětlit především ekonomickými důvody.

Tab. 3 Zastoupení zděných RD dle technologie výstavby v databázi.

Sledovaný faktor	Počet výskytů	Podíl v %
Jednovrstvé zdivo	78	14 %
Vícevrstvé zdivo	496	86 %
Celkem	574	100 %

Propustnost konstrukce pro vodní páru

Difuze vodních par skrze konstrukci stěny je diskutovaným parametrem staveb. Pokud jsou ve skladbě na vnějším líci použity materiály difuzně otevřené (minerální vlna, dřevovláknno) je konstrukce označena jako propustná pro vodní páru. V případě užití polystyrenu pak naopak. Konstrukce otevřené pro vodní páru převládají u dřevostaveb. V této kategorii se nachází také 78 rodinných domů navržených z jednovrstvého zdiva.

Tab. 4 Zastoupení RD dle difuze vodních par obvodovou konstrukcí v databázi.

Sledovaný faktor	Počet výskytů	Podíl v %
Propustné pro vodní páru	277	18 %
Nepropustné pro vodní páru	1 243	82 %
Celkem	1 520	100 %

Tvar objektu

Za účelem zjištění vlivu členitosti stavby je sledována také složitost půdorysu 1 NP. Jako jednoduchý je uvažovaný půdorys čtvercový či obdélníkový. Půdorysy s apsidou, ve tvaru písmen L, T a další jsou označeny jako složité.

Tab. 5 Zastoupení RD dle tvaru půdorysu 1 NP v databázi.

Sledovaný faktor	Počet výskytů	Podíl v %
Jednoduchý	686	45 %
Složitý	834	55 %
Celkem	1 520	100 %

Tvar střechy

Tvar střechy byl sledován především pro střechu plochou a šikmou. Tu dále ve členění valbová, sedlová a pultová. Šikmé střechy převládají v 93 % z celkového počtu 1 520 rodinných domů.

Tab. 6 Zastoupení RD dle tvaru střechy v databázi.

Sledovaný faktor	Počet výskytů	Podíl v %
Valbová	493	32 %
Sedlová	817	54 %
Plochá	108	7 %
Pultová	102	7 %
Celkem	1 520	100 %

Způsob vytápění

Způsob vytápění je rozdělen na dva sledované parametry. Tím prvním je samotný energonositel – rozlišováno je mezi plynem, tepelným čerpadlem (vzduch/voda nebo vzduch/vzduch) a elektrinou. Dále je rozlišeno z hlediska distribuce tepla v samotném domě. K lokálním topidlům se řadí elektrické přímotopy, radiátory a v některých případech i splitové jednotky tepelných čerpadel vzduch/vzduch. U podlahového vytápění se pak jedná o kombinaci elektrických rohoží a teplovodních systémů. V případě kombinací se jedná o užití podlahového vytápění obyčasnými pokoji, koupelně. Naopak o užití lokálních topidel v ložnicích a v chodbách.

Tab. 7 Zastoupení RD dle způsobu vytápění a distribuce tepla v domě v předmětné databázi.

Sledovaný faktor	Počet výskytů	Podíl v %	Sledovaný faktor	Počet výskytů	Podíl v %
Elektrina	1 110	73 %	Podlahové topení	481	32 %
Plyn	144	9 %	Lokální topidla	852	56 %
Tep. čerpadlo	266	18 %	Kombinace	187	12 %
Celkem	1 520	100 %	Celkem	1 520	100 %

Komín

Komín je ve většině nabídek nabízen jako nadstandardní vybavení. Takové nabídky na rodinné domy na klíč jsou označeny jako bez komínu. Pouze v 17 % je komín zahrnut v základní nabídce, převážně v kombinaci s elektrickým vytápěním, což do ledna 2020 bylo přípustným řešením z hlediska vyhlášky 78/2013 Sb. O energetické náročnosti budov. Databáze je sestavena v období únor až duben 2020 a řada dodavatelů na tyto změny nereagovala.

Tab. 8 Zastoupení RD dle existence komína v základním vybavení RD na klíč v databázi.

Sledovaný faktor	Počet výskytů	Podíl v %
Bez komína	1 264	83 %
Komín	256	17 %
Celkem	1 520	100 %

Garáž

Dalším sledovaným faktorem je existence garáže, alt. garážového stání. Pro účel výzkumu bylo garážové stání uvažováno jako polouzavřená krytá plocha. Pokud k objektu byla připojena pouze dřevěná konstrukce bez střechy, není započtena jako garážové stání.

Tab. 9 Zastoupení RD dle garáže v objektu v databázi.

Sledovaný faktor	Počet výskytů	Podíl v %
1 NP	965	63 %
1 NP + 2 NP	555	37 %
Celkem	1 520	100 %

Podlažnost

V databázi převládají stavby přízemní. U vícepodlažních staveb, resp. staveb s obytným podkrovím, převládá šikmá střecha s výrazně sníženou výškou prostoru (typická výška nadezdívky 1 až 1,25 m). Jako řešení 2 NP s částečným sešikmením jsou započteny prostory s min. výškou 2 m (obvykle kryté pultovou střechou).

Tab. 10 Zastoupení RD dle počtu podlaží ve zkoumané databázi.

Sledovaný faktor	Počet výskytů	Podíl v %
Garáž v objektu	351	23 %
Bez garáže	1 143	75 %
Gar. stání	26	2 %
Celkem	1 520	100 %

Součinitel prostupu tepla

Jak již bylo popsáno v části pojednávající o sběru dat, energeticky pasivní domy nejsou do databáze zahrnuty. Součinitel prostupu tepla stěny je vybrán jako reprezentant tepelně izolačních schopností obálky rodinných domů. Hodnoty součinitelů prostupu tepla byly v databázi vyhodnoceny viz tab. 11.

Tab. 11 Hodnoty součinitele prostupu tepla jednotlivých svislých obvodových konstrukcí rod. domů v databázi.

Součinitel prostupu tepla U $W/(m^2 \cdot K)$	
Minimum	0,12
Maximum	0,23
Medián	0,18

Cena obkladu

Jako dílčí ukazatel cenové úrovně podlahových krytin a obkladů je zvolena cena za 1 m² keramických obkladů, bez práce, vč. DPH. Ostatní povrchy reflektují tuto cenovou hladinu.

Tab. 12 Hodnoty součinitele prostupu tepla jednotlivých svislých obvodových konstrukcí rod. domů v databázi.

Cena ker. Obkladu v Kč, vč. DPH	
Minimum	230
Maximum	500
Median	305

Trh s nemovitostmi

V rámci sběru dat o prodeji rodinných domů byly sbírány také informace o materiálové bázi. Pouze v 8 případech se jedná o dřevostavbu. Podíl dřevostaveb ve sledované lokalitě tak činí 1,3 % za sledované období 42 měsíců. Ve 4 případech se jedná o novostavby, 2 rodinné domy dosahují odhadovaného stáří 30 až 70 let a 2 rodinné domy pak stáří nad 70 let. V ostatních případech se jednalo o zděné rodinné domy z různých materiálů.

5 DISKUZE

Jak je patrné z dílčích výsledků v předchozí kapitole, dřevostavby v databázi jsou stavěny téměř stejným podílem pro panelovou a staveništní montáž. U zděných rodinných domů převládá vícevrstvé zdivo a to v 86 %. Z hlediska difuze vodních pár skrze konstrukci stěny se nejčastěji nabízí difúzně uzavřená konstrukce. Nabízené rodinné domy jsou v 93 % zastřešeny šikmou střechou.

Na sestavené databázi převládají přízemní domy. U dvojpodlažních domů je druhé nadzemní podlaží nejčastěji řešeno jako podkroví pod šikmou střechou. Pevládá řešení bez garáže a garážového stání (75 %), stejně tak bez komínu v základním vybavení rodinného domu na klíč.

1 520 nabídek na rodinné domy na klíč dosahuje průměrné velikost 112,4 m² užitné plochy, což je 15 % méně jak uvádí ČSÚ pro rodinné domy dokončené v roce 2019 [1]. Faktem je, že do průměru ČSÚ je započtena i individuální výstavba, která průměrnou hodnotu může výrazně navýšit.

Dále dle údajů ČSÚ v roce 2019 náklady na 1 m² užitné plochy dosahovaly 26,6 tis. vč. DPH [1]. Na sestavené databázi je dosaženo jednotkové ceny (medián) 28,3 a 29,5 tis. vč. DPH. Rozdíl tak činí více jak 6 %. I tak je třeba upozornit, že jednotkové ceny ze sestavené databáze odpovídají spíše nižšímu standardu vybavení (sanita, povrchy, elektro).

6 ZÁVĚR

Na sestavené databázi 1 520 nabídek na typové rodinné domy na klíč jsou zhodnoceny základní faktory ovlivňující cenu stavby. Z dat ČSÚ a vyhodnocení samotné databáze lze predikovat "průměrný typový rodinný dům", který je nejčastěji nabízen. Ten je přízemní se šikmou střechou, vytápěný je elektrinou (přímotopy či radiátory). Byť je toto řešení z pohledu aktuální legislativy nepřipustné. Průměrná velikost domu je 112 m² s jednotkovými náklady cca 28,3 tis Kč, vč. DPH. Tento průměrný rodinný dům je bez garáže a komína. Z hlediska materiálu se jedná o zděný rodinný dům (viz statistiky), svislá nosná konstrukce je vícevrstvá, zateplena polystyrenem (difuzně nepropustná konstrukce), dosahující součinitele prostupu tepla 0,18 W/(m²·K). Cena keramických obkladů je v intervalu od 250 do 500 Kč/m² vč. DPH, Medián pak 305 Kč/m².

V rámci dalšího výzkumu byla sestavená databáze podrobena dalšímu zkoumání z hlediska faktorů, které nejvíce ovlivňují prodejní ceny. Základní faktory odpovídají diskutovaným parametrům v příspěvku. Analýza trhu ukazuje velmi nízké prodeje dřevostaveb, za sledovaného období se jednalo o podíl 1,3 % prodaných rodinných domů v lokalitě Brno-venkov. Obchodovatelnost je v dané lokalitě velmi nízká.

Poděkování

Příspěvek byl vytvořen díky výsledkům ze specifických výzkumů v rámci Ústavu soudního inženýrství VUT v Brně evidovaných pod čísly FAST/ÚSI-J-20-6366 a ÚSI-J-20-6442.

Použité zdroje

- [1] Bytová a nebytová výstavba a stavební povolení - časové řady. Český statistický úřad [online]. Praha, 2020, 22.10.2020 [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/bvz_crCitace_2
- [2] RŮŽIČKA, Martin. Moderní dřevostavba. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3298-5.
- [3] LENOCH, Josef a Petra HLAVÁČKOVÁ. The Assessment of the Character Profile of Wood-based House Users in the Czech Republic. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. 2015, 63(5), 1697-1709. ISSN 1211-8516. Dostupné z: doi:10.11118/actaun201563051697
- [4] WALBERG, Dietmar. Solid and timber construction in residential buildings / Massiv- und Holzbau bei Wohngebäuden. Mauerwerk. John Wiley, 2016/01/04, 20(1), 16-31. ISSN 1432-3427. Dostupné z: doi:10.1002/dama.201600685
- [5] POTKÁNY, Marek, Marek DEBNÁR a Monika ŠKULTÉTYOVÁ. Life cycle cost analysis for reference prototype building alternatives of silicate and wood bases structure. Acta Facultatis Xylogiae Zvolen res Publica Slovaca. Zvolen, 2019, 61(2), 137-152. ISSN 13363824. Dostupné z: doi:10.17423/afx.2019.61.2.13
- [6] LENOCH, Josef a František KALOUSEK. Ekonomické zhodnocení potenciálu a možností využití dřevní suroviny v oblasti dřevostaveb. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009. ISBN 978-80-7399-901-8.
- [7] PROKOP, Pavel. Porovnání tržních cen dřevostaveb dle jednotlivých stavebních systémů. Brno, 2018. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Josef Lenocho, Ph.D.

ANALÝZA TRHU S RODINNÝMI DOMY A VLIV JEJICH STAVEBNĚ TECHNICKÉHO STAVU NA TRŽNÍ CENU

HOUSES MARKET ANALYSIS AND THE INFLUENCE OF THEIR CONSTRUCTION TECHNICAL CONDITION ON THE MARKET PRICE

Tereza Jandásková^{*,1}

*jandaskova.tereza@usi.vutbr.cz

¹Ústav soudního inženýrství VUT v Brně, Purkyňova 464/11, Brno 612 00

Abstrakt

V rámci mikroekonomického výzkumu byla vytvořena databáze o 631 rodinných domech, která obsahuje veškeré z inzerce a veřejných zdrojů dostupné informace včetně prvotní zachycené nabídkové ceny a finální prodejní ceny rodinného domu. Tématem článku je, zda má stavebně technický stav vliv na prodejní cenu rezidenčních nemovitostí – rodinných domů ve vybrané lokalitě. Tento faktor je statisticky testován analýzou rozptylu (ANOVA), která potvrdila jeho význam. Rovněž byla v rámci realizovaného výzkumu provedena analýza realitního trhu rodinných domů v okrese Brno – venkov s definováním cenotvorných faktorů a jejich zastoupení ve sledovaném okrese.

Klíčová slova

Rodinný dům, prodejní cena, stavebně technický stav, analýza trhu, cenotvorné faktory

Abstract

As part of the microeconomic research, a database of 631 houses was created, which contains new information available from advertising and public sources, including the initial recorded offer prices and sales prices of the family house. The topic of the article is whether the construction technical condition has an effect on the selling price of residential real estate - family houses. This factor is statistically tested by analysis of variance (ANOVA). As part of the research, an analysis of the real estate market of family houses in the district of Brno - venkov was performed, with the definition of price-forming factors and their representation in the monitored district.

Key words

Houses, selling price, technical condition, market analysis, price setting factors

1 ÚVOD

Poptávka po rezidenčním bydlení a jejím pořízení je ze strany občanů stále aktuální otázkou i s ohledem k epidemiologické situaci v České republice v roce 2020. Vzhledem ke specifikům, které vykazuje trh s rodinnými domy ve městě Brně, byl pro analýzu zvolen okres Brno – venkov. Zahraniční publikace se v širším měřítku zabývají jedním z nejvýznamnějších cenotvorných faktorů, a to lokalitou, včetně vzdálenosti od centra města. Méně publikací má ve zkoumaných faktorech zahrnut i vliv stavebně technického stavu na prodejní cenu rodinného domu.

V okrese Brno – venkov bylo od roku 2017 do roku 2019 vystavěno celkem 3 442 rezidenčních nemovitostí [1].

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED

Zahraniční články, které řešily vlivy na prodejní cenu se velké míře zabývají mikroekonomickými a makroekonomickými faktory, rovněž lokalitou a vzdáleností od centra města. Pokud se autoři zabývali stavebně

technickým stavem a jeho vlivem na prodejní cenu nemovitostí, v rámci článků definovali i ostatní cenotvorné faktory, které jsou nezbytnou součástí následného statistického testování a modelování.

Cenotvornými faktory se ve svém článku zabývají autoři z Litvy. Tento výzkum vytvořil model veřejnosti s názorem na faktory, které mají dopad na ceny ve Vilniusu. Konkrétně zvolili 22 cenotvorných faktorů, které rozdělili do 5 skupin. Jednalo se o faktory týkající se okolí domova, okolí práce, rekreační okolí, bezpečnost a zdraví, blízkost centra města a estetika. Tento výzkum vytvořil model veřejnosti s názorem na faktory, které mají dopad na ceny ve Vilniusu. Rovněž v období mezi roky 2000–2009 zvolili autoři výzkumu 7 hlavních faktorů, které měly ve sledovaném období největší vliv na cenu nemovitostí, a to: poskytnuté půjčky bankovním klientům, počet postavených bytů, spotřebitelský index důvěry, průměrná úroková sazba půjček, průměrná cena velkého bytu v hlavním městě, změna HDP a průměrná míra inflace [2].

Další autoři z Litvy analyzovali trh ve Vilniusu u vícepodlažních budov (bytových domů). Hlavním faktorem uvádí, že vliv na cenu rezidenčních nemovitostí má prestiž lokality a staří budovy. Vliv má rovněž konstrukce obvodového zdiva, lokalita, kriminalita v daném okrese, stavebně technický stav domu, počet pater, místností, užitná plocha a stav kuchyně [3].

Slovníští autoři uvádí jako nejdůležitější faktor vzdálenost od centra, tak jako v mnohých evropských městech. V tomto směru jsou dle autorů již zahrnuty faktory – blízkost k obchodům, zdravotnickým zařízením, práci atd. Prodejní ceny rostly v závislosti na patře budovy a přítomnosti výtahu – čím vyšší patro, tím vyšší cena. Při absenci výtahu v budově byl efekt opačný. Rovněž autoři hodnotili pohled z nemovitosti – výhled na moře. Na základě analýzy stanovili, že je důležitá i absence negativních faktorů: hluk, blízkost průmyslového zařízení a dobrý technický stav bytu. Dále vyhodnotili, že je důležitá i energetická účinnost budovy [4]. Autoři Sirmans, Macpherson a Zietz poukazují na to, že domy jsou tvořeny velkým množstvím charakteristik, které mají vliv na cenu nemovitosti. Využívají hédonickou regresní analýzu k odhadu marginálního přínosu individuálních charakteristik. Studie obsahuje zjištění, že šikmá nebo plochá střecha, závlahový systém na trávník, zahradní vana, samostatný sprchový kout, dvojitá trouba a oplocení pozitivně ovlivňují cenu nemovitosti. Zatímco půdní prostor, zóna s výskytem zemětřesení, blízkost farmy pro chov dobytka a blízkost skládky, jakožto blízkost vedení vysokého napětí a zvýšené procento černošského a hispánského obyvatelstva negativně ovlivňují prodejní cenu nemovitosti. Tito autoři vytvořili následující kategorie vlivu na cenu nemovitosti: strukturální prvky (stáří, dispozice, výměra), vnitřní prvky (klimatizace, krb, vana), vnější prvky (garáž, bazén), vnější prostředí (pohled na jezero, oceán), sousedství, lokalita (kriminalita, golfové hřiště, stromy), veřejné služby (školy, občanská vybavenost), marketingové a prodejní faktory (doba trvání nabídky, obsazeno, trendy současnosti), finanční (daně týkající se nemovitostí, dražby) [5]. Polská autorka rovněž poukazuje na mnoho charakteristik rezidenčních staveb, které ovlivňují výslednou prodejní cenu. Ve výzkumu uvádí, že charakteristiky mohou být rozšířeny na základě analýzy trhu o definici zkoumané oblasti, období analýzy, mikroekonomické a demografické faktory. Zaměřuje se na vliv na cenu stavebně technického stavu a stanovení stupně opotřebení budovy [6].

3 METODIKA

Data

V rámci mikroekonomického výzkumu byla vytvořena databáze rodinných domů, která obsahuje prvotní zachycenou iniciační nabídkovou cenu a cenu prodejní, která byla získána formou cenového údaje z katastru nemovitostí. Současně byla sledována doba trvání nabídky od prvního zachycení v inzerci po podání návrhu na vklad do katastru nemovitostí. Tato databáze byla sestavována od března roku 2017 do února roku 2020. Kromě výše uvedených informací obsahuje také veškeré informace z realitní inzerce, následně byla doplněna o relevantní informace dostupné z veřejných zdrojů (ortofoto snímky, informace z katastru nemovitostí, streetview atd.) Vzhledem k časové závislosti prodeje rodinných domů probíhá dílčí sběr dat realizovaných cen do současné doby.

Definování cenotvorných faktorů

Cenotvorné faktory jsou definovány na základě provedené analýzy realitního trhu a byly rozděleny do tří konzistentních bloků. První blok zahrnuje základní cenotvorné faktory rodinných domů, druhým blokem jsou faktory zahrnující vybavení rodinných domů a třetím blokem jsou cenotvorné faktory zahrnující stavebně technické aspekty.

Mezi základní cenotvorné faktory rodinných domů, resp. všech nemovitých věcí obecně, je lokalita. Pro rezidenční nemovitosti je poté charakteristická dobrá dopravní dostupnost a občanská vybavenost. Mezi dopravní dostupnost lze řadit nejen napojení na silniční síť, ale i další druhy dopravy, zejména železniční a autobusovou dopravu. Podstatným cenotvorným faktorem je rovněž velikost rodinného domu (užitné plochy)

a velikost pozemku, který ke stavbě náleží. Možnosti parkování, a to, zda se předmětný rodinný dům nachází v záplavové oblasti, jsou významnými faktory. Mezi základní cenotvorné charakteristiky byly v tomto výzkumu zahrnuty rovněž parametry likvidnosti, a to doba trvání nabídky a změna iniciační nabídkové ceny ku ceně prodejní.

Do druhého bloku vybavení stavby a příslušenství byly zahrnuty faktory: bazén, kamna, krb, klimatizace, další příslušenství, zda je stavba v nadstandardní provedení, počet kuchyní, vytápění, rovněž byly zohledněny i prvky udržitelné výstavby například fotovoltaické panely, solární panely, tepelné čerpadlo či vytápění pelety.

Posledním blokem byl blok zahrnující stavebně technických stav zahrnuty: stav stavby, převládající typ střechy, materiál střešní krytiny, střešní prvky, stav krytiny, podstřešní prvky, stav oken a jejich materiál, stav sociálního zařízení (koupelny a toalety), fasáda, pozice objektu a jeho staří, a konstrukce stavby a materiálová báze stavby, průkaz energetické náročnosti budovy, podlažnost.

Použité metody

Na základě sestavené databáze prvků obsahující 631 rodinných domů o různém stavebně technickém stavu, staří, lokalitě a dalších rozhodných faktorů včetně provedené analýzy trhu v okrese Brno-venkov byly zvoleny zkoumané cenotvorné faktory. Pro zjištění statistické významnosti stavebně technického stavu na prodejní cenu rodinného domu byla zvolena analýza rozptylu (Analysis of Variance "ANOVA"). V článku byla použita jednofaktorová analýza s hladina významnosti 5 % ($p < 0.05$). Analýza rozptylu je metodou matematické statistiky a druhem statistického testování hypotéz. Tato metoda slouží k ověření, zda má hodnota určeného znaku statistický vliv. V případě tohoto příspěvku je otázka, zda má stavebně technický stav nemovitosti vliv na její prodejní cenu. Princip metody je založen na rozdělení posuzovaného znaku do dvou skupin [7]. Pro vyhodnocení byla zvolena tato metoda z toho důvodu, že je možné určit pouze vliv jedné nezávislé proměnné na proměnné závislé.

4 VÝSLEDKY

Analýza realitního trhu s důrazem na stavebně technický stav

V Tab. 1 jsou rozděleny rodinné domy dle staří. Nejvíce zastoupeny byly stavby v rozmezí staří 30 až 70 let staří. Naopak nejméně zastoupeny byly novostavby a stavby do 5 let. Tento procentuální podíl je způsoben mimo jiné tím, že sledovaná databáze neobsahuje prodeje developerských projektů, které nebyly dokončeny.

Tab. 1 Zastoupení rodinných domů o předpokládaném staří.

Rozdělení faktoru	Předpokládané staří	
	Počet prvků v databázi [ks]	Procentuální podíl [%]
do 5 let	61	10 %
do 30 let	94	15 %
do 70 let	399	63 %
nad 70 let	77	12 %
Celkem	631	100 %

V Tab. 2 je uveden stavebně technický stav rodinných domů, procentuální zastoupení obdobně kopíruje procentuální rozdělení staří.

Tab. 2 Zastoupení rodinných domů o různých stavech objektu.

Rozdělení faktoru	Stav objektu	
	Počet prvků v databázi [ks]	Procentuální podíl [%]
novostavba (do 5 let)	60	10 %
morálně zastaralý	210	33 %
k rekonstrukci	356	56 %
k demolici (statické poruchy)	5	1 %
Celkem	631	100 %

Další vyhodnoceným předpokládaným cenotvorným faktorem byl stav fasády. V obchodovaných rodinných domech se nejméně objevovala fasáda k rekonstrukci, a to pouze s 16 % zastoupení viz. Tab. 3.

Tab. 3 Zastoupení rodinných domů s rozdílnou fasádou.

Rozdělení faktoru	Fasáda	
	Počet prvků v databázi [ks]	Procentuální podíl [%]
původní	272	43 %
k rekonstrukci	103	16 %
nová	256	41 %
Celkem	631	100 %

Vyhodnocen byl rovněž typ střechy viz. Tab. 4, a to s rozdělením plochá a šikmá, jednoduchá a složitá. Poslední zmiňovaný typ byl zastoupen pouze marginálně.

Tab. 4 Zastoupení rodinných domů s rozdílným provedení střechy.

Rozdělení faktoru	Střecha	
	Počet prvků v databázi [ks]	Procentuální podíl [%]
plochá	34	5 %
šikmá (jednoduchá)	592	94 %
šikmá (složitá)	5	1 %
Celkem	631	100 %

Provedená analýza rozptylu

Stavebně technický stav byl rozdělen na "nový" a "starý", přičemž dělení bylo provedeno na základě rozdělení uvedeného v Tab. 2. Rodinné domy, které spadaly do kategorie "novostavba do 5 let" a "morálně zastaralý" byly zařazeny jako "nové". Rodinné domy z kategorií "k rekonstrukci" a "k demolici" byly zahrnuty jako "staré". Celkově se tedy mezi "novými" rodinnými domy nacházelo 270 entit v zastoupení 42,8 % a do "starých" bylo zařazeno 361 staveb 57,2 % viz Tab. 5.

Tab. 5 Faktor.

Výběr	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl
starý	361	994148114	2 753 872,89	2,50753E+12
nový	270	1551174839	5 745 091,99	6,88906E+12

Na základě zvolené nulové hypotézy: hodnota nezávislé veličiny nemá vliv na hodnotu závislé veličiny. V tomto případě stavebně technický stav nemá vliv na prodejní cenu nemovitostí. Zda $F < F_{krit}$, pak platí nulová hypotéza, tj. nezávislá veličina nemá vliv. Nulová hypotéza byla zamítnuta.

Tab. 6 ANOVA.

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	1,3821E+15	1	1,3821E+15	315,4496516	1,66378E-57	3,856285098
Všechny výběry	2,75587E+15	629	4,38135E+12			
Celkem	4,13797E+15	630				

Na základě provedené analýzy rozptylu bylo zjištěno, že stavebně technický stav má vliv. Je závislý na celkové prodejní ceně rodinného domu.

5 DISKUZE

Na základě zahraniční rešerše byla provedena analýza trhu v okrese Brno – venkov v segmentu trhu rodinných domů. Američtí autoři Sirmans a kol. rozdělili faktory ovlivňující cenu rodinných domů na strukturální prvky, vnější prvky, vnitřní prvky, vnější prostředí, sousedství a lokalitu, veřejné služby, marketingové a prodejní faktory

a faktory finanční. Při volbě cenotvorných faktorů v prováděném výzkumu jsou výše zmíněné oblasti rovněž reflektovány, avšak s vlivem specifík segmentu trhu rodinných domů na území České republiky. Současně je volba cenotvorných faktorů limitována informačními zdroji na našem území a sestavenou databází samotnou. Obdobně jako u amerických autorů byly jako cenotvorné faktory zvoleny strukturální prvky (stáří, výměra pozemku a užitná plocha rodinného domu). Vnitřní a vnější prvky jsou následně reflektovány v druhém bloku, kde jsou kromě vnitřního vybavení nemovitosti rovněž uvedeny parametry likvidnosti, doba trvání nabídky a rozdíl nabídkové a realizované ceny. Zahmata je také lokalita a vnější prostředí. V navazujícím výzkumu naopak nebudou řešeny finanční faktory.

Raslanas zařadil mezi cenotvorné faktory, které mají vliv na prodejní cenu, stavebně technický stav, stáří i tloušťku obvodového zdiva. Výzkum byl však realizován na vícepodlažních budovách. Slovinští autoři poukazují, že dobrý stavebně technický stav bytu byl hodnocen pozitivně ve smyslu vlivu na prodejní cenu. Vliv na prodejní cenu stavebně technického stavu byl potvrzen i na sledované databázi o 631 rodinných domech v okrese Brno – venkov.

6 ZÁVĚR

Dílejší výsledky výzkumu je možné uplatnit jako vstupní hodnoty do komparativního způsobu ocenění v rámci tržního oceňování nemovitostí, rovněž i jako informace pro dílejší analýzy trhu s rezidenčními nemovitostmi a následný odhad tržní hodnoty.

Náročnost realizovaného výzkumu spočívá mimo jiné v jeho časové závislosti: sběru dat (časově náročný proces zeizení nemovitosti, tj. převod), jakož i párování jednotlivých entit. Další fází výzkumu bude nutnost podrobně testovat jednotlivé cenotvorné faktory, obsahující stavebně technický stav. Testování bude probíhat metodou nejmenších čtverců (kvantilovou regresí), kde v rámci jednotlivých bloků bude testována statistická významnost jednotlivých faktorů a jejich závislost na prodejní ceně. Další fáze výzkumu se poté bude věnovat modelováním dvou proměnných likvidnosti, a to době trvání nabídky a změně iniciační nabídkové ceny ku ceně prodejní.

Poděkování

Príspevek bol zpracován za podpory Mezifakultního specifického vysokoškolského výzkumu MŠMT č.j. FAST/ÚSI-J-20-6366.

Použitá zdroje

- [1] Bytová a nebytová výstavba a stavební povolení - časové řady. Český statistický úřad [online]. Praha, 2020, 22.10.2020 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/bvz_crCitace 2.
- [2] Buriskiene, M., Rudzkiene V., & Venckauskaite, J. (2011). Models of factors influencing the real estate price. Environmental Engineering, The 8th International Conference, 873–878.
- [3] Raslanas, S. (2004) Vilniaus miesto daugiaaukščio būsto rinkos vertės tyrimai, Technological and Economic Development of Economy 10(4) pp 167–173 .
- [4] Ferlan N, Bastic, M and Psunder I (2017) Influential Factors on the Market Value of Residential Properties, Engineering Economics 28(2) pp 135-144.
- [5] Sirmans, G.S., Macpherson D. A., and Zietz E.N. (2005). "The Composition of Hedonic Pricing Models". Journal of Real Estate Literature 13 (1) pp 3–43.
- [6] Ziembicka, B. (2016). The Influence of the Technical Condition of a Building on the Property's Market Value, Folia Oeconomica Stetinensia, vol. 16(1), pp 196-207.
- [7] Gudmund R. I., Helmut N., "Analysis of Variance" (1987), SAGE Publications, 1987, ISBN: 0803930011, 9780803930018.

8.

Geodézie, kartografie a geoinformatika

**Geodesy, Cartography
and Geographic Information Science**

APLIKÁCIA NA OBNOVU KATASTRÁLNEHO OPERÁTU KOREKCIOU

APPLICATION FOR THE CADASTRAL OPERATE RENEWAL BY CORRECTION

Peter Kysel^{*,1}

*peter.kysel@stuba.sk

¹ Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra geodézie, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Abstrakt

Nehnutelnosti predstavujú aj v dnešných ťažkých časoch istotu. Preto je veľmi dôležité pre vlastníkov týchto nehnuteľností, aby ich evidencia v katastri nehnuteľností bola kvalitou na úrovni 21. storočia. V katastri nehnuteľností sa však nachádza množstvo rôznych chýb a nepresností, ktoré znižujú kvalitu evidovania nehnuteľností. Je nutná ich oprava alebo doplnenie. Príspevok sa zaoberá obnovou katastrálneho operátu korekciou, ktorú je možné uplatniť vo vektorových katastrálnych mapách s lokálnymi posunmi a predstavuje rýchlu a lacnú možnosť obnovy týchto máp. Táto metóda využíva transformáciu časti mapy s lokálnymi posunmi do správnej polohy s využitím nových meraní. Pre potreby tejto obnovy bola vytvorená aplikácia v jazyku R, ktorá ešte viac zjednoduší a zrýchli celý proces obnovy mapy.

Kľúčové slová

Vektorová katastrálna mapa, obnova, transformácia, aplikácia

Abstract

Properties are a certainty even in these trying times. That's why it is important for the owners of these properties to have their evidence in the cadastre on the high qualitative level. Many errors and inaccuracies are found in the cadastre, which decrease the quality of property evidence. Their correction is needed. The paper deals with the cadastral operate renewal by correction, which is applicable in the vector cadastral maps with local deformations and represent a fast and cheap solution for the renewal of these maps. This method uses a transformation of a part of the map with local deformations into the correct position using new measurements. For the purpose of this renewal, a new app in the R language was created, which would simplify and fasten the whole process of a map renewal.

Keywords

Vector cadastral map, renewal, transformation, app

1 ÚVOD

Vlastníctvo nehnuteľností je aj v dnešných časoch pandémie ochorenia COVID-19 veľmi dôležitou témou v spoločnosti, pretože ich vlastníkom poskytujú určitú finančnú istotu. Pre vlastníkov je veľmi dôležité, aby ich nehnuteľnosti boli v katastri nehnuteľností evidované s vysokou kvalitou, ktorá by zodpovedala dnešným náročným požiadavkám. V katastri nehnuteľností, najmä v mapovom fonde sa dnes nachádza veľké množstvo nekvalitných údajov, ktorých história siaha až do čias rakúsko-uhorskej monarchie. Z hľadiska kvality delíme katastrálne mapy na kvalitnejšie, katastrálne mapy číselné, a na tie nekvalitnejšie, katastrálne mapy nečíselné. Všetky mapy katastra sú spravované v digitálnej vektorovej forme s presne stanovenou štruktúrou, preto môžeme hovoriť o vektorových katastrálnych mapách (VKM).

Ani vektorové katastrálne mapy číselné (VKMč) niekedy nie sú až také kvalitné, ako by sa na prvý pohľad mohlo zdať. Poloha všetkých podrobných bodov v nich síce bola určená číselnými metódami v záväznom súradnicovom systéme S-JTSK, ale pri meraní došlo k rôznym chybám a nepresnostiam. Tieto chyby sa stali najmä pri budovaní podrobného polohového bodového poľa, čo spôsobilo, že v mape sa nachádzajú tzv. lokálne posuny a deformácie. To znamená, že v určitých oblastiach sa poloha podrobných bodov v katastrálnej mape líši od ich skutočnej polohy v rozmedzí od niekoľkých desiatok centimetrov až po niekoľko metrov v extrémnych prípadoch.

Tieto oblasti s lokálnymi posunmi sú dnes postupne odhaľované pri aktualizácii VKM geodetmi, ktorí pri meraní používajú technológiu GNSS. Táto technológia je v zásade nezávislá a pri meraní už nie sú potrebné body podrobného polohového bodového poľa. Práve vďaka tomu sú odhalené. Lokálne posuny majú vo väčšine prípadov systematický charakter, teda ich veľkosť a smer je približne rovnaký. Môžeme povedať, že ani niektoré VKMč nie sú dostatočne presné a je nutná ich obnova.

Dnes existuje len jeden spôsob obnovy VKM, ktorým je obnova katastrálneho operátu novým mapovaním. Tento proces nie je pre VKMč s lokálnymi posunmi vhodný, pretože lokálne posuny sa nachádzajú väčšinou v malých ohraničených lokalitách, a nie v celom katastrálnom území. Nové mapovanie je tiež veľmi finančne aj časovo náročné, takže jeho využitie by bolo neefektívne. V rámci výskumu autora bol navrhnutý nový spôsob obnovy VKM s lokálnymi posunmi – obnova katastrálneho operátu korekciou (obnova korekciou).

Pre účely obnovy korekciou v katastrálnych mapách s lokálnymi posunmi bola v programovacom jazyku R vytvorená jednoduchá aplikácia, ktorá v rámci niekoľkých sekúnd poskytne výsledok v podobe analýzy, či je možné využiť obnovu korekciou, a súradnic transformovaných bodov. Aplikácia je otestovaná na vzorke dát z katastrálneho územia Hlohovec, pričom je posudzovaná správnosť jej výsledkov a jej efektívnosť z časového hľadiska. Programovací jazyk R bol vybraný z dôvodu jeho jednoduchosti a širokých možností v oblasti štatistických analýz a ich grafického vyjadrenia. Táto aplikácia prináša do procesu obnovy korekciou ešte väčšie zrýchlenie a zefektívnenie, čím sa v konečnom dôsledku šetrí čas aj financie.

2 SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Mapové dielo katastra nehnuteľností obsahuje množstvo máp s rôznou dobou vzniku, k čomu sa viaže aj ich rôzna kvalita, charakterizovaná najmä spôsobom tvorby, súradnicovým systémom, kartografickým zobrazením, a taktiež spôsobom aktualizácie, s ktorou súvisí viacnásobné prekresľovanie, zosúvisľovanie a transformácia [1]. Mapové dielo je heterogénne a nespĺňa náročné požiadavky na evidenciu nehnuteľností, preto je nutná jeho homogenizácia.

VKM sa delia na dve skupiny. Prvou skupinou sú VKM číselné. Tieto mapy vznikli na podklade číselných výsledkov meraní a každý podrobný bod v týchto mapách má určenú presnú polohu v záväznom systéme S-JTSK, realizácii JTSK, a má pridelenú hodnotu kódu kvality podrobného bodu $T = 1$ až $T = 4$ [2]. Druhou skupinou sú VKM nečíselné. Body v týchto mapách nemajú určenú polohu meraním. Presnosť bodov v nečíselných katastrálnych mapách je dnes odhadovaná asi na 2 až 5 m [3].

Príspevok sa ďalej zaoberá VKM číselnými. Tieto mapy vznikli na podklade číselných výsledkov meraní, pričom sa najčastejšie využívala polárna metóda, ortogonálna metóda, prípadne metóda GNSS v novších číselných mapách. Výsledkom merania boli súradnice jednotlivých podrobných bodov v záväznom súradnicovom systéme S-JTSK, realizácii JTSK, ktoré sú dnes dokumentované v katastri. Ak dnes zameriame niektorý z podrobných bodov v číselnej katastrálnej mape, polohová odchýlka medzi bodom v mape a bodom z nového merania by mala spĺňať kritériá [4]. Tieto kritériá sú stanovené na základe kódu kvality podrobného bodu vo vektorovej katastrálnej mape. Pre body s kódom kvality $T = 3$ a $T = 4$ a taktiež pre body s kódom kvality $T = 1$ a $T = 2$, ktorých poloha bola určená pred nadobudnutím platnosti Vyhlášky ÚGKK SR č. 87/2013 platí, že najväčšia prípustná hodnota polohovej odchýlky je na úrovni 0,24 m. Pri bodoch s kódom kvality $T = 1$ alebo $T = 2$ určených po nadobudnutí platnosti Vyhlášky ÚGKK SR č. 87/2013 sa najväčšia prípustná hodnota polohovej odchýlky rovná hodnote 1,7-násobku ich strednej súradnicovej chyby m_{xy} . Táto hodnota je rovná 0,14 m [4]. Strednú súradnicovú chybu vypočítame podľa vzťahu (1).

$$m_{xy} = \sqrt{(0.5(m_x^2 + m_y^2))}, \quad (1)$$

kde m_x a m_y sú stredné chyby v smere súradnicových osí x a y .

S príchodom nových technológií sa začali používať aj nové metódy na určovanie polohy bodov. Pravdepodobne najpoužívanejšou je dnes metóda GNSS-RTK, ktorá umožňuje prakticky nezávislé určenie súradnic jednotlivých podrobných bodov. V období keď sa táto metóda začala používať pri bežných meraniach sa zistilo, že ani vektorové katastrálne mapy číselné nie sú až také kvalitné, ako sa predpokladalo. V určitých oblastiach sa objavili rôzne chyby a lokálne posuny, kde polohová odchýlka na podrobných bodoch nevyhovovala vyššie spomenutým kritériám. Tento posun má však zväčša systematický charakter v určitej ohraničenej oblasti. V týchto oblastiach sa uplatňuje špeciálny spôsob aktualizácie vektorovej katastrálnej mapy, daný Vyhláškou ÚGKK SR č. 461/2009 [2] [5]. V oblastiach s lokálnymi posunmi v mape sa novourčené body po meraní transformujú najprv základnou transformáciou do záväzného súradnicového systému S-JTSK, do realizácie JTSK. Potom sú ešte transformované lokálnou transformáciou do „deformovanej“ mapy s využitím identických bodov, ktorých poloha sa určí metódou GNSS-RTK. Novourčené body po základnej transformácii sa všetky spoja do jedného objektu vo vrstve BODY, pričom sa im prideli kód kvality $T = 1$ a symbol $S = 1310$ [5]. Ukážku vektorovej katastrálnej mapy číselnej s lokálnym posunom a vrstvou BODY môžeme vidieť na Obr. 1.



Obr. 1 Vektorová katastrálna mapa s lokálnym posunom a vrstvou BODY [spracoval autor].

Dnes je už veľmi ťažké určiť pôvod týchto lokálnych posunov v číselných katastrálnych mapách. Predpokladá sa však, že vznikli pri pôvodnom mapovaní, nedodržaním všetkých kvalitatívnych požiadaviek, a často aj pripájaním meračskej siete na body rôznych účelových sietí (napr. poriečny polygón), ktoré mali nehomogénnu polohovú presnosť [6].

Dnes sa novourčené body siete ukladajú do vrstvy BODY, ale neexistuje žiadna jednotná koncepcia, ako „nedeformované“ súradnice v tejto vrstve využiť. Preto bol v rámci výskumu autora navrhnutý nový spôsob obnovy – obnova korekciou [7].

3 METODIKA

Na ešte väčšie zefektívnenie a zrýchlenie celého procesu obnovy korekciou bola vytvorená jednoduchá aplikácia v programovacom jazyku R na transformáciu bodov vo vektorovej katastrálnej mape a analýzu výsledkov. Tento jazyk poskytuje široké možnosti v oblasti štatistických analýz, a taktiež aj grafickej interpretácie výsledkov, najmä pomocou knižnice ggplot2. Programovanie prebehlo pomocou nástroja RStudio.

Prvým krokom je načítanie vstupných dát, ktoré pozostávajú z troch súborov vo formáte TXT. V prvom súbore s názvom ib.txt sa nachádzajú úplné čísla a súradnice identických bodov v oboch súradnicových systémoch, teda prebraté z vektorovej katastrálnej mapy a zamerané pomocou technológie GNSS. Identické body slúžia na výpočet transformačných parametrov zhodnostnej transformácie. Ďalší súbor má názov kb.txt a obsahuje úplné čísla a súradnice kontrolných bodov v rovnakom tvare ako predchádzajúci súbor s identickými bodmi. Kontrolné body slúžia na analýzu výsledkov transformácie a porovnanie so stavom pred transformáciou. Posledný súbor s názvom tb.txt obsahuje súradnice ostatných bodov v transformovanej oblasti, ktorých súradnice poznáme iba v systéme mapy a chceme ich transformovať do správnej polohy. Po načítaní vstupných dát sú súradnice všetkých bodov najprv zredukované o súradnice ťažiska transformovanej oblasti, keďže tá je zväčša malá a výsledky transformácie by boli pri ponechaní pôvodných súradníc v súradnicovom systéme S-JTSK nejednoznačné.

Prvou fázou obnovy korekciou je analýza homogenity mapy. Tá v tomto prípade pozostáva z jednoznačného ohraničenia chybnéj lokality (najčastejšie ulicami) a následne analýzy veľkosti a smeru lokálnych posunov na kontrolných bodoch. Veľkosť posunov Δp a smer posunov α sú vypočítané podľa vzťahov (2) a (3).

$$\Delta p = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \quad (2)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right), \quad (3)$$

kde Δx a Δy sú súradnicové rozdiely medzi bodom vo VKM a meraným bodom v smere jednotlivých súradnicových osí. Kvadrant smerníka je určený podľa znamienka jednotlivých súradnicových rozdielov. Na výpočet v jazyku R je využitá funkcia atan2, ktorá kvadrant určuje automaticky. Po výpočte smeru a veľkosti posunov na jednotlivých kontrolných bodoch sú pomocou vstavaných funkcií jazyka R vypočítané ich maximálne,

minimálne a priemerné hodnoty, a taktiež ich štandardná odchýlka. Na základe týchto hodnôt je rozhodnuté, či je lokalita vhodná na transformáciu alebo nie.

Po pozitívnom výsledku predchádzajúcej analýzy sa prechádza do druhej fázy, ktorou je transformácia mapy v danej oblasti do správnej polohy. Využíva sa rovinná zhodnostná transformácia, ktorej transformačné rovnice sú nasledovné:

$$Y = Y_0 + y \cos(\varepsilon) - x \sin(\varepsilon), \quad (4)$$

$$X = X_0 + y \sin(\varepsilon) + x \cos(\varepsilon), \quad (5)$$

kde X, Y sú súradnice bodu v novom systéme (správnom) a x, y sú súradnice bodu v pôvodnom systéme (v systéme mapy). Y_0, X_0 a ε sú transformačné parametre – translácie v smere oboch súradnicových osí a pootočeniu systému. Transformačné rovnice sú linearizované pomocou substitúcie:

$$a = \cos(\varepsilon); b = \sin(\varepsilon), \quad (6)$$

$$\varepsilon = \arctg\left(\frac{b}{a}\right). \quad (7)$$

Neznámymi parametrami transformácie sú teda translácie Y_0, X_0 a parametre a, b . Minimálny počet identických bodov na vykonanie zhodnostnej transformácie sú 2, ale odporúča sa použiť minimálne 4-5 identických bodov. V tom prípade bude situácia preurčená a je možné odhadnúť transformačné parametre metódou najmenších štvorcov. Najprv je potrebné si zostaviť vektor absolútnych členov I , ktorý pozostáva zo súradníc identických bodov v novom systéme, teda meraných technológiou GNSS. Ďalej je potrebné si zostaviť maticu plánu A , ktorá pozostáva z derivácií transformačných rovníc podľa jednotlivých neznámych parametrov. Následne je možné pristúpiť k samotnému odhadu vektora neznámych parametrov Θ podľa vzťahu (8):

$$\Theta = (A^T A)^{-1} A^T I. \quad (8)$$

V jazyku R sa na odhad neznámych parametrov používa vstavaná funkcia solve, ktorá slúži na riešenie systému lineárnych rovníc. Po odhade neznámych transformačných parametrov môžeme pristúpiť k samotnej transformácii ostatných bodov (kontrolných a transformovaných) pomocou transformačných rovníc (4) a (5).

Po transformácii sa prechádza do poslednej fázy obnovy korekciou, ktorou je analýza dosiahnutých výsledkov. Na množine kontrolných bodov sú opäť vypočítané smer a veľkosť posunov na týchto bodoch medzi transformovaným bodom a meraným bodom. Na výpočet sú opäť využité vzťahy (2) a (3). Následne sú vypočítané maximálne, minimálne a priemerné hodnoty a štandardné odchýlky veľkosti a smeru posunov.

Nakoniec nasleduje už len export a vizualizácia údajov. Výstupom z aplikácie sú 3 súbory. Prvý súbor s názvom `analiza_pred.txt` obsahuje výsledky analýzy posunov v danej oblasti pred transformáciou. Druhý súbor s názvom `analiza_po.txt` obsahuje výsledky analýzy posunov na kontrolných bodoch po transformácii. Posledný súbor s názvom `body_transformovane.txt` obsahuje transformované súradnice všetkých bodov v danej oblasti. Posuny na kontrolných bodoch pred a po transformácii sú vizualizované pomocou tzv. šípkového grafu, z ktorého je zrejmý smer aj veľkosť posunov. Na vizualizáciu v jazyku R sa využívajú nástroje knižnice `ggplot2`.

4 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Funkčnosť aplikácie bola vyskúšaná v testovacej lokalite v katastrálnom území Hlohovec, ohraničenej ulicami Čsl. armády, 9. mája, Petra Jilemnického a Arpáda Felcána (Obr. 2). V tejto lokalite sa nachádza vo VKM lokálny posun, ktorého obvod je jednoznačne ohraničený. Ako prvé boli vytvorené vstupné súbory pomocou softvéru Kokeš. Ako identické body boli použité 4 body nachádzajúce sa na rohoch celej oblasti, v Obr. 2 vyznačené červenou farbou. Ako kontrolné body bolo použitých 12 bodov, nachádzajúcich sa tiež na okrajoch oblasti, v Obr. 2 vyznačené modrou farbou. Identické aj kontrolné body boli zamerané metódou GNSS-RTK s pripojením na sieť SKPOS dňa 2. 3. 2020.

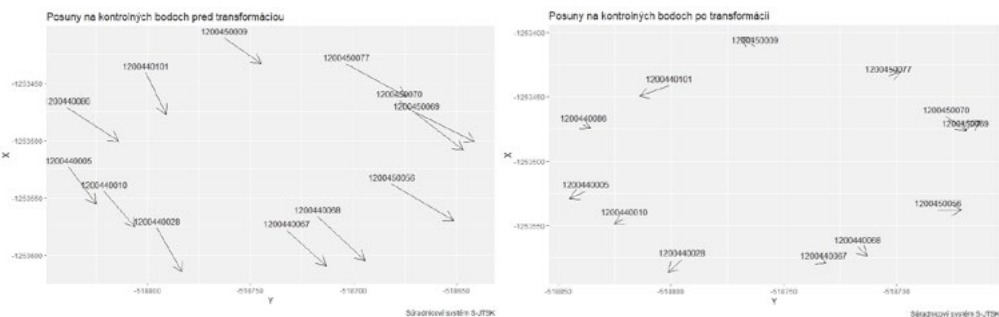
Po načítaní všetkých vstupných súborov bola aplikácia spustená a v priebehu niekoľkých sekúnd bola vykonaná analýza posunov, transformácia všetkých bodov, a nakoniec opäť analýza posunov po transformácii. Výsledky analýzy posunov pred a po transformácii môžeme vidieť v Tab. 1. Grafické znázornenie posunov pred a po transformácii pomocou tzv. šípkového grafu môžeme vidieť na Obr. 3.



Obr. 2 Testovaná lokalita v katastrálnom území Hlohovec [spracoval autor].

Tab. 1 Analýza posunov pred a po transformácii.

parameter	Pred transformáciou		Po transformácii	
	Δp [m]	α [g]	Δp [m]	α [g]
priemer	0,39	336,7508	0,08	351,7450
št. odch	0,06	12,2292	0,04	96,4288
maximum	0,53	-	0,16	-
minimum	0,28	-	0,01	-



Obr. 3 Grafické znázornenie posunov na kontrolných bodoch pred transformáciou [spracoval autor].

Z uvedených výsledkov je zrejme, že použitie aplikácie na obnovu korekciou bolo v testovanej oblasti úspešné. Lokálny posun z mapy bol odstránený, čo vidíme na maximálnej, minimálnej aj priemernej hodnote posunu v Tab. 1, ktoré sú už po transformácii nižšie ako hodnota maximálnej dovolenej polohovej odchýlky. Taktiež aj smerníky posunov majú vysokú štandardnú odchýlku, čo znamená, že posun má po transformácii už iba náhodný charakter. Veľmi dobrou interpretáciou výsledkov je grafické znázornenie posunov na kontrolných bodoch pomocou tzv. šípkového grafu, kde je pred transformáciou možné vidieť systematickosť posunov, a po transformácii ich menšiu veľkosť a náhodný charakter (Obr. 3). Výsledky taktiež zodpovedajú výsledkom, ktoré boli dosiahnuté pri klasickom výpočte pomocou softvérov Kokeš a Microsoft Excel.

Významným prínosom aplikácie na obnovu korekciou je celková časová úspora. Pri klasickom výpočte posunov bolo nutné najprv manuálne odmerať polohovú odchýlku a smerník a manuálne ich prepísať do softvéru

Microsoft Excel, kde boli tieto hodnoty následne analyzované. Pri transformácii bolo taktiež potrebné manuálne určiť identické body z mapy aj merania. Celý tento proces trval pri testovacej oblasti približne 30 minút. Veľkým rizikom pri tomto spôsobe výpočtu bolo manuálne prepisovanie údajov, kde mohlo veľmi ľahko dôjsť k chybe, čoho dôsledkom mohli byť chybné výsledky analýzy posunov. Všetky tieto problémy pri použití aplikácie odpadávajú. Jedinou vecou, ktorú musí operátor vykonať, je vytvorenie vstupných súborov. Tento proces je však poloautomatický a prakticky tu nemôže dôjsť k hrubým chybám. Proces vytvorenia vstupných súborov zaberie skúsenému operátorovi iba niekoľko minút. Po vytvorení vstupných súborov sa už len spustí aplikácia a všetky výsledky sú dostupné do pár sekúnd. Použitím aplikácie sa teda ešte viac zrýchli a zefektívni celý proces obnovy korekciou.

Je nutné podotknúť, že v príspevku je prezentovaná zatiaľ iba prvá verzia aplikácie, ktorá potrebuje ešte ďalšie úpravy. Najväčšou výzvou bude naprogramovať import a export údajov vo formáte VGI, v ktorom je uložený súbor vektorovej katastrálnej mapy. Potom by už nebolo potrebné vytvárať niektoré vstupné súbory, ale bol by načítaný iba súbor mapy z oblasti, ktorú chceme opraviť a súbor s meranými bodmi, kde by boli súradnice priradené bodom v mape na základe čísla bodu. Pri exporte by bol taktiež vytvorený priamo súbor vo formáte VGI obsahujúci jednotlivé objekty parciel po transformácii. Ďalším krokom bude vytvorenie grafického užívateľského rozhrania pre aplikáciu, ktoré by umožňovalo ešte jednoduchšiu a príjemnejšiu prácu s aplikáciou.

5 ZÁVER

Príspevok sa zaoberá obnovou korekciou. Tento proces je využiteľný pri vektorových katastrálnych mapách číselných, v ktorých sa nachádzajú oblasti s lokálnymi posunmi a deformáciami. Proces obnovy korekciou pozostáva z analýzy lokálnych posunov v danej oblasti, transformácie oblasti do správnej polohy na základe množiny identických bodov, a nakoniec analýzy lokálnych posunov po transformácii, čím sa overia výsledky transformácie. Pre potreby tohto procesu bola vytvorená jednoduchá aplikácia v programovacom jazyku R, ktorá obsahuje všetky vyššie vymenované fázy. Aplikácia bola vyskúšaná v testovacej lokalite v katastrálnom území Hlohovec, pričom bola porovnaná s klasickým prístupom v oblasti správnosti výsledkov aj v časovej oblasti. Na základe výsledkov je možné tvrdiť, že pri použití aplikácie boli dosiahnuté rovnaké výsledky ako pri klasickom výpočte pomocou softvérov Kokeš a Microsoft Excel. Lokálne posuny v testovacej lokalite boli úspešne odstránené a mapa bola opravená. Aplikácia taktiež priniesla významnú časovú úsporu. Celý proces sa pri použití aplikácie skrátil z pol hodiny na niekoľko minút. Preto je možné tvrdiť, že prezentovaná aplikácia ešte viac zjednodušila a zrýchliла proces obnovy korekciou. Do budúcnosti je ešte plánované vylepšenie, resp. pridanie niektorých súčastí, ako napríklad import a export údajov vo formáte VGI alebo grafické užívateľské rozhranie.

Použitá zdroje

- [1] Horňanský, I., Leitman, M., Ondrejčka, E. „Na ceste k homogenizácii katastrálneho mapového diela.“ Geodetický a kartografický obzor 60/102, 2014, s. 229-240. ISSN 1805-7446.
- [2] Vyhláška ÚGKK SR č. 461/2009 Z. z., ktorou sa vykonáva zákon č. 162/1995 Z. z. o katastri nehnuteľností a o zápise vlastníckych a iných práv k nehnuteľnostiam (katastrálny zákon) v znení neskorších predpisov.
- [3] Čada, V. „Využití geodetických základů stabilního katastru, historie vzniku a užití mílových tabulek.“ Geodetický a kartografický obzor 47/89, 2001, s. 271-280. ISSN 1805-7446.
- [4] Usmernenie ÚGKK SR č. 3/2014 na opravu podrobných bodov a výmer pozemkov evidovaných ako parcely registra „C“ a parciel registra „E“. Úrad geodézie, kartografie a katastra Slovenskej republiky, 2014.
- [5] Usmernenie, ktorým sa ustanovuje obsah a forma podkladov na aktualizáciu súboru geodetických informácií katastra nehnuteľností v katastrálnych územiach, v ktorých je spravovaná číselná vektorová katastrálna mapa č. USM_UGKK SR_9/2013. Úrad geodézie, kartografie a katastra Slovenskej republiky, 2013.
- [6] Hudcová, L., Kysel, P. „Vector cadastral maps numerical homogeneity analysis.“ Geodetski list, 74. s. 41-56. ISSN 1849-0611
- [7] Kysel, P. „Obnova vektorovej katastrálnej mapy číselnej s lokálnymi posunmi s využitím meraní metódou GNSS.“ Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering. Zborník príspevkov. Bratislava: STU v Bratislave, 2020 (v tlači)

AUTOMATIZOVANÁ KONTROLA KVALITY REALIZÁCIE STAVEBNÝCH OBJEKTOV

AUTOMATED QUALITY CONTROL OF REALISATION OF BUILDING STRUCTURES

Gabriela Bariczová*¹, Ján Erdélyi¹

* gabriela.bariczova@stuba.sk

¹Katedra geodézie, Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Abstrakt

Článok sa v krátkosti zaoberá informačným modelovaním stavieb a tvorbou digitálnych dvojčiat stavieb využitím moderných metód zberu priestorových údajov (TLS a fotogrametria), pričom predstavuje algoritmus na automatizovanú kontrolu vyhotovenia stavebných objektov. Popisuje algoritmus pre automatizovanú tvorbu rozdielových modelov medzi BIM modelom a údajmi získanými z TLS resp. fotogrametricky. Výsledky slúžia na verifikáciu geometrických parametrov konštrukčných prvkov (ako napr. rovinnosť stien, priamosť potrubí), ako aj určenie odchýlok ich umiestnenia (poloha a orientácia) od samotného projektu (BIM modelu). Takto získané údaje slúžia ako podklad na kvalifikáciu a kvantifikáciu odchýlok počas riadenia výstavby.

Kľúčové slová

Kontrola stavieb, BIM, IFC, mračno bodov, automatizovaná kontrola

Abstract

The paper briefly deals with building information modelling and creation of digital twins of buildings using modern techniques of spatial data collection (TLS). It describes an algorithm for automated verification of the building's structures. It presents algorithms for automated difference model creation between the BIM model and data obtained from TLS or photogrammetry. The results are used to verify the geometric parameters of structural elements (such as flatness of walls, straightness of pipes etc.), as well as to determine deviations in their location (position and orientation from the project itself). The information obtained is a basis for the qualification and quantification of deviations during construction management.

Key words

Verification of buildings, BIM, IFC, point cloud, automated verification

1 ÚVOD

V súčasnej dobe vstupujú informačné technológie čoraz intenzívnejšie do procesu životného cyklu stavby od projektovania až po prevádzku stavieb. Vhodným nástrojom, ktorý sa v posledných rokoch využíva počas celého života stavby, je informačné modelovanie stavieb (v angl. Building Information Modelling) známe pod pojmom BIM, ktorého výsledkom je virtuálny model stavby (BIM model). Na Slovensku je v posledných rokoch intenzívna snaha zavádzať BIM do stavebného cyklu, ktorého neoddeliteľnou súčasťou sú aj geodeti a tým pádom BIM predstavuje nový prístup k výkonu geodetických a kartografických činností v investičnej výstavbe. BIM model spolu s inovatívnymi metódami zberu priestorových informácií umožňujú detailnú kontrolu skutočného vyhotovenia stavebných diel. V súčasnosti najefektívnejšími metódami zberu informácií sú terestrické laserové skenovanie (TLS) resp. blízka fotogrametria, ktorých výsledkom sú mračná bodov. Práve využitie informácií obsiahnutých v detailných mračných bodov a informácií BIM modelu je vhodným nástrojom na kontrolu kvality daného diela, častokrát až v reálnom čase.

Cieľom predkladaného článku je predstaviť návrh automatizovaného algoritmu na kontrolu vyhotovenia stavebných objektov v softvérovom prostredí Matlab©, pričom pre automatizovaný výpočet bola vytvorená samostatná aplikácia. Aplikácia slúži na kontrolu kvality realizácie stavebných objektov, pričom vstupnými údajmi sú BIM model (projekt) a mračno bodov (realizácia).

2 APLIKÁCIA PRE AUTOMATIZOVANÚ KONTROLU STAVEBNÝCH OBJEKTOV

Automatizovaná kontrola stavebných objektov znamená kontrolu polohy, orientácie a rovinnosti stien. Odchýlky realizovaného stavebného objektu od projektu sú vyjadrené rozdielovými modelmi. K tomu, aby mohli byť vyhotovené rozdielové modely, je potrebné získať roviny jednotlivých geometrických objektov z projektu (BIM modelu) a z realizácie (mračna bodov).

Informačné modelovanie stavieb (BIM) je 3D modelovanie stavieb, využívané v rôznych odvetviach stavebného priemyslu, ktorého výsledkom je BIM model. Posledné roky je BIM vo svete aj na Slovensku využívané čoraz častejšie pri nových projektoch, ale aj pri rekonštruovaných stavbách. Nakoľko sa BIM modely využívajú počas celého života stavby, je potrebné využívať výmenné formáty pre zdieľanie dát. Existujú rôzne výmenné formáty pre BIM modely, napríklad CAD formáty, CIS/2, CityGML, pričom každý výmenný formát je zameraný na iné údaje. Najčastejšie používaným výmenným formátom je IFC (v angl. Industry Foundation Classes). IFC je textový súbor v ASCII (v angl. American Standard Code for Information Interchange) kóde, ktorého cieľom je poskytnúť otvorený a neutrálny prístup na ukladanie a výmenu BIM modelov medzi rôznymi softvérovými aplikáciami [1].

Pre zber priestorových údajov je jednou z najefektívnejších metód terestrické laserové skenovanie (TLS), ktorého výsledkom je mračno bodov. Metódou TLS je možné vykonať bezkontaktný zber údajov, ktorý je v porovnaní s inými metódami rýchlejší a výsledok je detailný (vzhľadom na parametre skenovania). Mračná bodov sa častokrát používajú na generovanie geometrie pre BIM modely.

Identifikácia geometrických parametrov rovín z IFC súboru

Výmenný formát IFC predstavuje otvorenú špecifikáciu pre údaje z BIM modelov o geometrických objektoch, ktoré sa vymieňajú a zdieľajú medzi rôznymi účastníkmi projektu stavby alebo správy budov [1]. Formát IFC vyvinulo medzinárodné združenie pre interoperabilitu (v angl. BuildingSMART), pričom je štandardizovaný normou ISO 16739:2018 Industry Foundation Classes (IFC) pre zdieľanie dát v stavebníctve a facility managemente.

IFC sa skladá z hlavičky a z popisu geometrických prvkov v rámci BIM modelu. Zo súboru je potrebné identifikovať pre jeden prvok súradnice začiatočného bodu (IfcCartesianPoint), smer (IfcDirection), dĺžku (RectangleProfileDef), výšku (IfcExtrudeAreaSolid) a hrúbku (IfcWall) (Obr. 1).

```

#326= IFCCARTESIANPOINT((51995.1110077108,20583.7768044136,0.));
#328= IFCDIRECTION((-0.533954923697831,-0.845512944583844,0.));
#330= IFCCAXIS2PLACEMENT3D(#326,#20,#328);
#331= IFCLOCALPLACEMENT(#143,#330);
#332= IFCCARTESIANPOINT((3968.71044757762,0.));
#334= IFCPOLYLINE((#10,#332));
#336= IFCSHAPE REPRESENTATION(#103,'Axis','Curve2D',(#334));
#338= IFCCARTESIANPOINT((1984.35522378881,-7.81597009336110E-13));
#340= IFCCAXIS2PLACEMENT2D(#338,#26);
#341= IFCRECTANGLEPROFILEDEF(.AREA.,$, #340,3968.71044757762,199.999999999999);
#342= IFCCAXIS2PLACEMENT3D(#6,$,$);
#343= IFCEXTRUDEAREA SOLID(#341,#342,#20,2500.);
#344= IFCSTYLEITEM(#343, (#185), $);
#347= IFCSHAPE REPRESENTATION(#105,'Body','SweptSolid',(#343));
#349= IFCPRODUCTDEFINITION SHAPE($,$, (#336,#347));
#353= IFCWALL('1NxUD1Or0Re26yoDk8vH2', #42,'Basic Wall:Generic - 200mm:2021);
  
```

Začiatočný bod
Jednotkový smerový vektor
Dĺžka steny
Výška steny
Hrúbka steny

Obr. 1 Definícia geometrie steny v IFC súbore.

Identifikované údaje slúžia na odhad parametrov roviny steny, pričom sa najprv vypočítajú súradnice štyroch rohov roviny steny pomocou priestorovej polárnej metódy, z nich sa následne vypočíta ťažisko roviny steny. Na základe týchto bodov sa odhadujú koeficienty všeobecnej rovnice roviny steny (1) pomocou singulárnej dekompozície matice redukovaných súradníc.

$$aX + bY + cZ + d = 0 \quad (1)$$

kde a , b , c sú prvky normálového vektora, d je číslo, ktorého hodnota sa rovná skalárnemu súčinu normálového vektora a polohového vektora ľubovoľného bodu, X , Y , Z sú priestorové súradnice bodu.

Segmentácia rovín z mračna bodov

Algoritmus na spracovanie mračen bodov je založený na kombinácii prvkov modifikovaného RANSAC (v angl. RANdom SAmple Consensus) algoritmu a metódy povrchov [2], pomocou ktorého segmentuje z mračna bodov roviny prislúchajúce rovinám identifikovaným z IFC. Samotný RANSAC algoritmus je založený na iteráciách odhadnutých parametrov geometrických prvkov zo súboru pozorovaných údajov, ktoré obsahujú odľahlé hodnoty [3].

Segmentácia sa začína výberom 100 najbližších bodov od ťažiska roviny steny (získaný z IFC súboru), pričom počet prvých bodov závisí od hustoty mračna bodov. Následne sa oblasť týchto bodov aproximuje rovinou, ktorá sa odhaduje ortogonálnou regresiou [2]. V tomto prípade vychádza riešenie zo všeobecnej rovnice roviny (1). Využíva sa ťažisko roviny steny, ktoré sa získa z IFC, pričom sa využíva vzťah (2).

$$X_{mean} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i}; Y_{mean} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i}; Z_{mean} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i} \quad (2)$$

kde X, Y, Z sú súradnice 4 rohov rovín steny. Následne sa určia redukované súradnice (súradnicové rozdiely) vzťahom:

$$X_{red} = X - X_{mean}; Y_{red} = Y - Y_{mean}; Z_{red} = Z - Z_{mean} \quad (3)$$

Ďalej sa pomocou súradnicových rozdielov zostaví matica redukovaných súradníc a vykoná sa singulárny rozklad matice (v angl. Singular Value Decomposition) redukovaných súradníc riešením rovnice [3]:

$$A = U \cdot \Sigma \cdot V^T \quad (4)$$

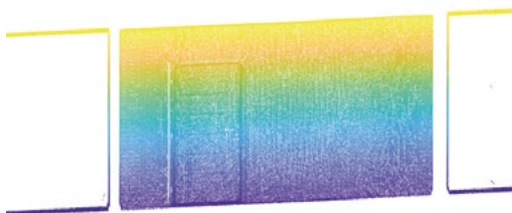
kde A je matica redukovaných súradníc, stĺpcové vektory U sú normované vlastné vektory matice AA^T , V sú normované vlastné vektory matice $A^T A$ a Σ je diagonálna matica s prvými tromi singulárnymi číslami matice $A^T A$ na hlavnej diagonále. Normálny vektor regresnej roviny je teda stĺpcovým vektorom matice V , ktorá prislúcha najmenšiemu singulárnemu číslu matice $A^T A$ [3]. Týmto spôsobom sú získané koeficienty a, b, c všeobecnej rovnice roviny, ktoré tvoria normálny vektor roviny. Parameter d sa získa, tým že sa do normálneho vektora dosadia súradnice ťažiska X_0, Y_0, Z_0 , vypočítaného z mračna vybraných bodov (5).

$$d = -(a \cdot X_0 + b \cdot Y_0 + c \cdot Z_0) \quad (5)$$

V ďalšom kroku sa oblasť vybraných bodov zväčší na 1000 najbližších bodov a testuje sa, či ležia v odhadnutej rovine. Algoritmus pri každom zväčšení počtu vybraných bodov porovnáva, či ležia v odhadnutej rovine z predchádzajúcej iterácie [2]. Rovina je prepočítaná po každej iterácii pomocou všetkých bodov, ktoré spĺňajú kritérium ortogonálnej vzdialenosti od odhadnutej roviny. V každej ďalšej iterácii sa počet bodov zväčšuje štvornásobne a opakuje sa výpočet pomocou vzťahov (2) až (5). Iteratívny výpočet prebieha dovtedy, kým oblasť roviny prestane rásť, resp. pokiaľ sa nájde vždy aspoň jeden bod, ktorý by ovplyvnil odhadnutú rovinu [4]. Prahová hodnota, ktorá nám udáva dĺžkové kritérium pre vzdialenosť segmentovaných bodov od odhadnutej regresnej roviny, je v tomto prípade odporúčaná v intervale do 100 mm.

Filtrácia bodov na základe normálových vektorov

Po segmentácii sa pristupuje ku filtrácii bodov na základe lokálnych normál bodov mračna, nakoľko sa pri segmentácii využíva dĺžkové kritérium, pri ktorom sa segmentujú nielen body roviny steny, ale aj vedľajších konštrukčných prvkov, ktoré vyhovujú dĺžkovému kritériu (Obr. 2).



Obr. 2 Segmentované body pred filtráciou na základe normál.

V prvom kroku segmentácie sa aplikuje na mračno bodov výpočet lokálnych normál v každom bode mračna a to tak že je odhadnutá lokálna rovina z k -najbližších susedov (v angl. Nearest Neighbor). Počet najbližších bodov definuje veľkosť roviny, ku ktorej sa počítajú normály v danom bode mračna a závisí od hustoty mračna bodov. Vypočítané normálové vektory sa skalárne vynásobia normálovým vektorom príslušných rovín získaných po segmentácii (6) a následne je možné vypočítať uhol, ktorý zvierajú.

$$\cos(\alpha) = \Delta_{norm} = n_{PoC} \cdot n_{point} \quad (6)$$

kde n_{PoC} je normálový vektor príslušnej regresnej roviny mračna bodov a n_{point} je normálový vektor bodov testovanej lokálnej roviny. Keďže roviny stien nie sú dokonalo rovinné, je potrebné definovať vstupnú hodnotu pre maximálne odchýlky normál. Odporúčaná hodnota sú maximálne 4° pri nerovných stenách. Týmto krokom sa zo segmentovaného mračna odstránia body, ktoré prislúchajú konštrukčným prvkom priamo nesúvisiacimi s rovinou steny (napr. Roviny stien vedľajších miestností, časť dverí apod.) (Obr. 3).



Obr. 3 Segmentované body po filtrácii na základe normál.

Tvorba rozdielových modelov

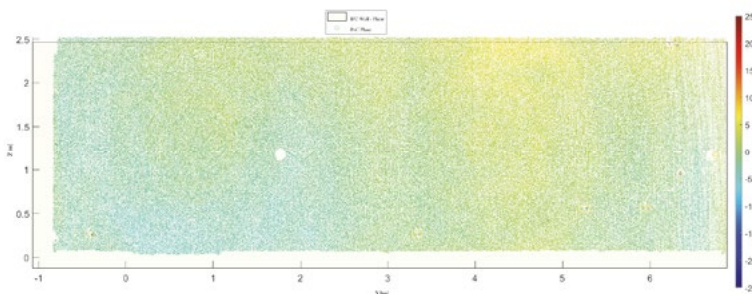
Pre každú rovinu steny sa generujú dva rozdielové modely (Obr. 4, Obr. 5). Prvý rozdielový model je porovnanie roviny BIM modelu a jej prislúchajúcej roviny segmentovanej z mračna bodov. Druhý rozdielový model zobrazuje rovinnosť stien. Pre oba rozdielové modely boli počítané maximálne a minimálne odchýlky, priemerné odchýlky a absolútne maximum odchýlok. Pre prvý rozdielový model, bolo počítané aj pootočenie $roll$ a odchýlka δ dvoch rovín. Pootočenie rovín sa počíta vzťahom (7) a odchýlku rovín sa počíta vzťahom (8).

$$roll = \arccos(n_{IFC} \cdot n_{PoC}) \quad (7)$$

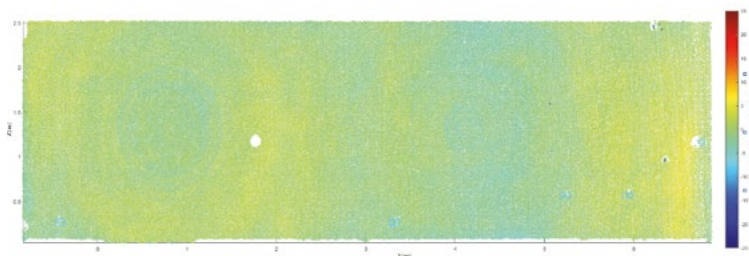
kde $roll$ je natočenie rovín, n_{IFC} je normálový vektor roviny steny z BIM modelu a n_{PoC} je normálový vektor odhadnutej regresnej roviny zo segmentovaného mračna bodov, ktorá prislúcha rovine steny z BIM modelu.

$$\delta = (|d_{IFC}| - |d_{PoC}|) \quad (8)$$

kde δ je vzdialenosť dvoch regresných rovín, d_{IFC} je rovný skalárnemu súčinu normálového vektora roviny BIM modelu s ľubovoľným polohovým vektorom roviny BIM modelu a d_{PoC} je rovný skalárnemu súčinu normálového vektora roviny segmentovaného mračna bodov s ľubovoľným polohovým vektorom odhadnutej regresnej roviny z mračna bodov.



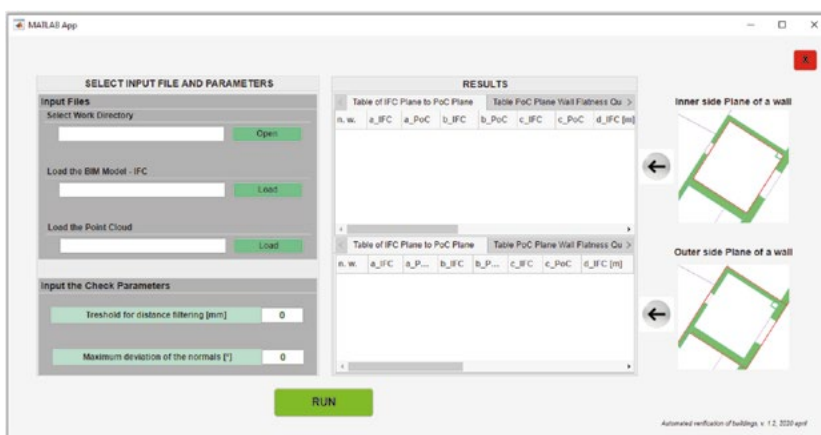
Obr. 4 Porovnanie roviny BIM modelu a regresnej roviny segmentovanej z mračna bodov.



Obr. 5 Rovinnosť roviny steny.

Vývoj samostatnej aplikácie

Aby bolo možné kontrolu stavebných objektov vykonať automatizovane, bola vytvorená samostatná aplikácia v softvéri Matlab®. Ako prvé si používateľ vyberie v dialógovom okne (Obr. 6) adresár, následne v aplikácii načíta BIM model vo formáte IFC a mračno bodov vo formáte *.pts, *.txt alebo *.xyz. Následne používateľ definuje vstupné parametre: prahovú hodnotu pre segmentáciu mračna bodov a maximálnu odchýlku normál. Po načítaní vstupných súborov a nastavení vstupných parametrov sa spustí výpočet tlačidlom RUN. V rámci výpočtu prebehne identifikácia geometrických parametrov z IFC, segmentácia rovín z mračna bodov a výpočet výsledkov kontroly objektu, pričom výsledkom sú 2 rozdielové modely pre každú rovinu steny a súbor *.xlsx s číselnými charakteristikami rovín.



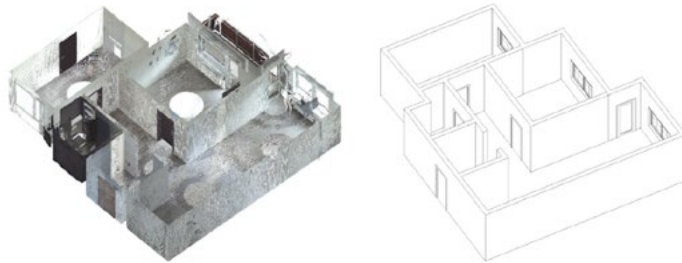
Obr. 6 Dialógové okno aplikácie.

3 PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA

Verifikáciu vyššie spomínaného algoritmu sme vykonali na základe prípadovej štúdie, v rámci ktorej sme kontrolovali geometrické parametre stien bytu na základe BIM modelu (Obr. 7) a údajov z TLS (Obr. 7). Jedná sa o trojizbový byt s rozlohou približne 70 m². Pre verifikáciu bolo mračno bodov prevzorkované na hustotu 10 mm. Prahová hodnota pre segmentáciu mračien bola 50 mm a maximálna odchýlka normál bola volená v hodnote 3°.

Výsledky porovnania dvoch modelov rovín, ktoré ukazujú najväčšie odchýlky sa nachádzajú v Tab. 1 až Tab.3, pričom Tab.1 sa zaoberá porovnaním parametrov rovín z BIM modelu a z mračna bodov, Tab. 2 sa nachádzajú vzájomné polohy rovín z BIM modelu a mračna bodov a Tab. 3 zobrazuje rovinnosť roviny. V tabuľkách sa nachádzajú výsledky len pre jednu rovinu steny, vzhľadom na rozsah článku.

V prípade všetkých rovín bolo maximálne natočenie v hodnote 0,5° a maximálna vzdialenosť rovín 49,7 mm. Maximálna odchýlka bodov mračna od roviny bola 65 mm, pričom tieto maximá sa vyskytujú v oblasti elektrických zásuviek. V prípade rovinnosti sú odchýlky v intervale od -35 mm do 35 mm, pričom tieto maximá sa nachádzajú v oblasti dverí, elektrických zásuviek a pod.



Obr. 7 Mračno bodov (vľavo) a generalizovaný BIM model (vpravo) prípadovej štúdie.

Tab. 1 Porovnanie parametrov rovín.

č. r.	a _{IFC}	a _{PoC}	b _{IFC}	b _{PoC}	c _{IFC}	c _{PoC}	d _{IFC} [m]	d _{PoC} [m]
1	0,842	-0,841	-0,540	0,541	0,000	0,002	1,497	-1,501

Tab. 2 Parametre odchýlok rovín.

č. r.	roll [°]	Δ[mm]	max_dev [mm]	min_dev [mm]	avg_dev [mm]	abs_max [mm]
1	0,1	-4	34	-16	-1	34

Tab. 3 Rovinnosť steny.

č. r.	max_dev [mm]	min_dev [mm]	avg_dev [mm]	abs_max [mm]
1	14	-30	0	30

4 ZÁVER

Cieľom predkladaného príspevku bolo predstaviť aplikáciu na automatizovanú kontrolu vyhotovenia stavebných objektov, pričom vstupmi sú BIM model, ktorý máme vo formáte IFC a mračno bodov už existujúceho stavebného objektu. Pomocou navrhnutej aplikácie môže používateľ jednoducho vykonať geometrické overenie rovín stien, pričom v príspevku je v krátkosti ukázaný aj experiment aplikácie.

PodĎakovanie

Práca súvisí s aktivitami vyvíjanými v rámci riešenia projektu APVV-18-0247 "Automatizácia kontroly elektronickej dokumentácie stavieb s využitím inovatívnych technológií zberu údajov a virtuálnych modelov".

Použité zdroje

- [1] ISO 16739-1:2018 - "Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries — Part 1: Data schema" [Internet]. 2018 [cited 2020 Oct 28]. Available from: <https://www.iso.org/standard/70303.html>
- [2] Honti R, Erdélyi J, Kopáček A. Plane segmentation from point clouds. Pollack Period [Internet]. 2018 Aug 1 [cited 2020 Oct 29]; 13(2):159–71. Available from: <https://akjournals.com/view/journals/606/13/2/article-p159.xml>
- [3] Fischler MA, Bolles RC. Random sample consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. Commun ACM. 1981 Jun 1; 24(6):381–95.
- [4] Honti R., Bratislava. Segmentácia rovín. Geodetický a kartografický obzor. 2019; 89–94.

ALGORITMUS NA AUTOMATIZOVANÚ IDENTIFIKÁCIU A ODHAD SFÉRICKÝCH TVAROV Z MRAČIEN BODOV

ALGORITHM FOR AUTOMATED IDENTIFICATION AND SEGMENTATION OF SPHERES FROM POINT CLOUDS

Richard Hontí^{*1}

^{*}richard.honti@stuba.sk

¹Katedra geodézie, Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovensko

Abstrakt

Dnes je možné získať obrovskú množinu priestorových údajov za relatívne krátky časový okamih. Po zhromaždení týchto údajov, ďalším nutným krokom je ich spracovanie. Automatizácia krokov spracovania môže prispieť k zvýšeniu efektivity, k zníženiu času potrebného na spracovanie a k zníženiu interakcií spracovateľa. Predkladaný príspevok prináša stručný prehľad jednotlivých metód na identifikáciu a odhad sférických tvarov z mračna bodov. Ďalej je predstavený inovatívny algoritmus pre automatizáciu uvedeného procesu. Na začiatku algoritmu je navrhnutá metóda na výpočet krivosti lokálnej plochy v každom bode mračna. Navrhnutý algoritmus bol testovaný na komplexných mračnách bodov. V poslednej časti príspevku je popísaná implementácia algoritmu do samostatnej aplikácie v softvéri Matlab®.

Klíčová slova

Odhad sfér, mračno bodov, segmentácia, automatizované spracovanie

Abstract

Today huge datasets can be captured in a relatively short time. After collecting these data, the next step is their processing. Automation of the processing steps can contribute to efficiency increase, to the reduction of the time needed for processing, and to the reduction of interactions of the user. The paper brings a short review of the most reliable methods for sphere segmentation. Next, an innovative algorithm for automated spherical shape-based segmentation from 3D point clouds is introduced. At the beginning of the algorithm a method for the curvature computation of the point cloud in each point is proposed. The algorithm proposed was tested on complex point clouds. In the last part, the implementation of the algorithm to a standalone application in Matlab® software is described.

Key words

Sphere extraction, point cloud, segmentation, automated processing

1 ÚVOD

Mračná bodov pomocou súčasne dostupnej prístrojovej technicky sa dajú získať relatívne rýchlo a jednoducho čoho výsledkom je, že sa stávajú čoraz viac používanou prvotnou digitálnou reprezentáciou stavebných objektov. Mračná bodov ale vo väčšine prípadov obsahujú obrovskú množinu údajov, niekoľko miliónov 3D bodov, a zároveň môžu obsahovať aj množiny bodov, ktoré sú pre daný účel nepotrebné, t. j. zbytočne zaťažujú spracovanie. Z uvedených dôvodov je potrebný vývoj algoritmov na ich spracovanie. Mračná bodov hrajú dôležitú úlohu pri rôznych činnostiach, ako napr. pri tvorbe 3D modelov s vysokou detailnosťou v oblastiach, ako sú interiérový (exteriérový) dizajn, informačné modelovanie stavieb (z angl. Building Information Modeling - BIM), informačné systémy miest a obcí, dokumentácia skutočného vyhotovenia objektov, 3D kataster a pod.

V stavebnom priemysle sa často stretávame s objektmi, ktorých tvar je tvorený zo základných geometrických útvarov, ako sú rovina, valec, sféra. Z tohto dôvodu pri spracovaní mračien bodov zachytávajúcich takéto objekty jedna zo základných krokov je detekcia a odhad geometrických tvarov z mračna. Tejto problematike sa vo svete

venuje viacero odborníkov. O možnostiach segmentácie rovín je možné sa dočítať v [1] a o segmentácii valcových plôch v [2].

Po rovinných a valcových útvaroch, tretím najčastejšie sa vyskytujúcim geometrickým útvarom v stavebnom priemysle je sféra (resp. guľa). Identifikácia a modelovanie sférických plôch má využitie vo viacerých oblastiach, ako sú napr. reverzné inžinierstvo [3], lekárske zobrazovanie [4], kalibrácia terestrických laserových skenerov (resp. digitálnych kamier) [5], registrácia mračien bodov [6]. Keďže pri viacerých zo spomenutých aplikácií je nutné aby segmentácia sfér bola vykonaná automatizovane a s čo najvyššou presnosťou, tento článok je venovaný práve tejto problematike.

Na začiatku článku sú stručne popísané možné prístupy a metódy na odhad sfér z 3D mračien bodov. Následne je predstavený navrhnutý algoritmus na segmentáciu sfér. Algoritmus dokáže vykonať segmentáciu plne automatizovane, presne a robustne aj z mračien bodov, ktoré obsahujú šum. Príspevok ďalej predstavuje experimentálne testovanie a výsledky z testovania navrhnutého algoritmu. V poslednej časti je popísaná implementácia algoritmu do samostatnej aplikácie v softvéri MATLAB®.

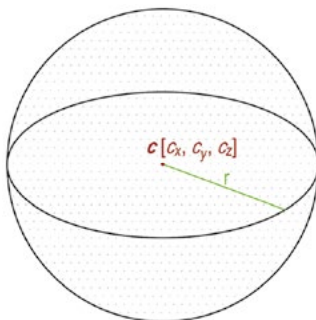
2 IDENTIFIKÁCIA A ODHAD SFÉR

Segmentácia sfér z mračien bodov sa vo väčšine prípadov vykonáva na základe dvoch prístupov, prvým je RANSAC (z angl. RANdom SAmple Consensus) [7] a druhým je využitie Houghovej transformácie [8].

Algoritmus RANSAC je definovaný, ako iteratívna metóda na určenie parametrov matematického modelu z meraných údajov, ktoré môžu obsahovať aj vybočujúce merania [9]. Dnes sa často používa na robustný odhad parametrov matematických modelov geometrických tvarov z mračna bodov. RANSAC používa na odhad parametrov modelu minimálny počet náhodne vybraných bodov. Minimálny počet predstavuje najnižší možný počet bodov, ktorý je potrebný pre jednoznačné definovanie daného geometrického útvaru (napr. pre odhad roviny v 3D priestore minimálny počet bodov je 3). Pomocou tejto metódy je možné vykonať segmentáciu rýchlo a presne, avšak v niektorých prípadoch je potrebné si nastaviť niekoľko prahových hodnôt. V prípade komplexných zašumených mračien to môže byť problematické. Ďalšou nevýhodou je, že výsledok segmentácie je závislý od náhodného výberu počiatočného bodu, a v najhoršom prípade sa môže stať, že RANSAC nekonverguje k správne výsledku, teda neodhadne sa sférická plocha, ktorá sa nachádza v mračne. Okrem toho prístupy založené na metóde RANSAC sú väčšinou obmedzené na odhad jednej sféry naraz.

Druhou metódou je Houghova transformácia (HT) [10]. HT je jedna z najviac používaných metód, ktorá bola vyvinutá na odhad priamok, následne ale bola rozšírená na odhad parametrických a neparametrických tvarov. Hlavným nedostatkom HT je, že v prípade rozsiahlych a komplexných mračien segmentačný proces je časovo a výpočtovo náročný. Okrem toho sa takisto väčšinou využíva na odhad jednej sféry naraz. Každá metóda má svoje výhody, ale aj nevýhody, práve preto v praktických aplikáciách sa vo väčšine prípadov využíva ich kombinácia.

Vo všeobecnosti sférickú plochu je možné popísať so štyrmi parametrami (Obr. 1), ktoré sú nasledovné: priestorové súradnice stredu sféry ($c [c_x, c_y, c_z]$), a polomer sféry (r).



Parametre sféry.

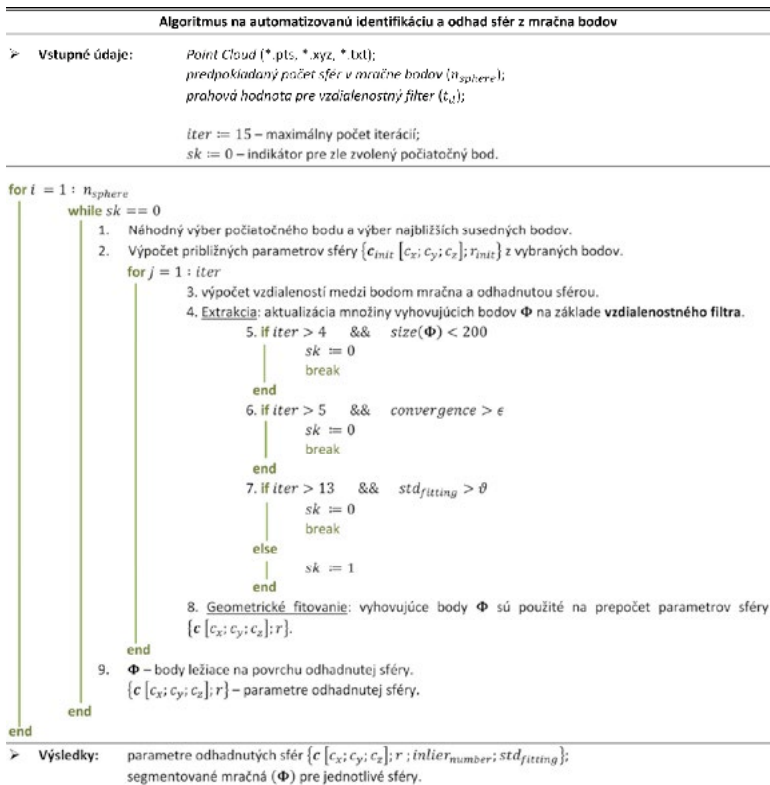
Následne, rovnicu sféry je možné matematicky sformulovať pomocou (1):

$$(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 + (z - c_z)^2 = r^2 \quad (1)$$

kde x, y a z sú priestorové súradnice bodu na povrchu sférickej plochy.

3 ALGORITMUS NAVRHNUTÝ NA AUTOMATIZOVANÚ IDENTIFIKÁCIU A ODHAD SFÉRICKÝCH TVAROV

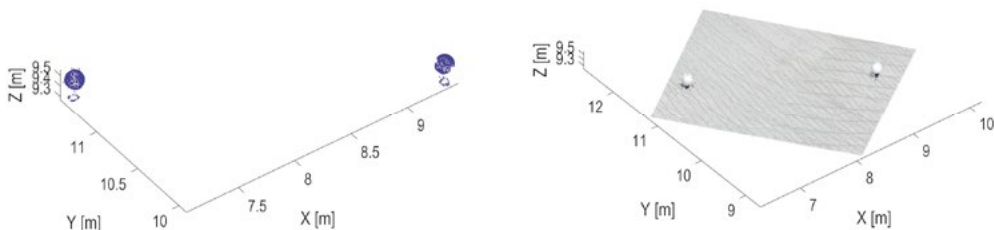
V rámci tejto sekcie je predstavený navrhnutý algoritmus pre automatizovanú identifikáciu a odhad sfér z mračna bodov. Pseudokód algoritmu je zobrazený na Obr. 2. Vstupom do algoritmu je mračno bodov, predpokladaný počet sfér v mračne a prahová hodnota pre vzdialostný filter (t_d).



Pseudokód navrhnutého algoritmu.

Filtrácia mračna bodov na základe krivosti lokálnej plochy

Z dôvodu zefektívnenia a zrýchlenia výpočtu pred samotnou segmentáciou sfér sa vykoná výpočet tzv. krivosti lokálnej plochy v každom bode mračna.



Filtrácia mračna bodov 2 sfér na základe krivosti lokálnej plochy.

Krivost'ou v tomto prípade sa rozumie zmena orientácie normálového vektora lokálnej plochy v danom bode. Krivosť sa určí na základe uhla medzi normálovým vektorom v danom bode a normálovými vektormi v najbližších susedných bodoch. Na základe vypočítanej krivosti sa následne vyberú podmnožiny bodov mračna, kde sa predpokladá výskyt sférickej plochy.

Na Obr. 3, vpravo je zobrazené pôvodné mračno bodov, ktoré obsahovalo cca. 128 tisíc bodov a 2 sféricke útvary, následne vľavo je zobrazené mračno po filtrácii na základe krivosti lokálnej plochy (cca. 1500 bodov), t. j. približne 98 % bodov z mračna sa odfiltrovalo. Pomocou uvedeného kroku predspracovania mračna (filtrácie) je možné dosiahnuť výraznú redukciu času potrebného na výpočet.

Následne pri segmentácii sfér výber počiatočných bodov sa vykoná z filtrovaných podmnožín bodov a nie z celého mračna. S týmto krokom filtrácie je možné dosiahnuť zníženie výpočtového času a zároveň zvýšenie efektivity.

Automatizovaná identifikácia a odhad sfér

Po vykonaní filtrácie mračna na základe krivosti, prvým krokom segmentačného algoritmu je náhodný výber počiatočného bodu, t. j. algoritmus vyberie jeden bod z podmnožiny mračna (kde sa predpokladá výskyt sféry) náhodne, v ktorom sa začne iteratívny odhad.

Prvý odhad sféry je vykonaný z 50 najbližších susedov pomocou metódy geometrického fitovania, ktorá minimalizuje ortogonálne vzdialenosti bodov od sféry. Odhadnutými parametrami sú už uvedené parametre ($\mathbf{c} [c_x, c_y, c_z]$) a polomer r . Tieto odhadnuté približné parametre sa následne použijú v iteračnom procese spresňovania odhadu a aktualizácie množiny vyhovujúcich bodov (extrakcia - 4. v pseudokóde – Obr. 2), ktorý sa vykonáva na základe vzdialenostného filtra. Kritérium pre vzdialenostný filter je navrhnutý nasledovne:

$$|\Delta dist_i| < r \cdot t_{d[\%]}, \quad (2)$$

kde r predstavuje polomer sféry, t_d je prahová hodnota pre vzdialenostný filter, a $\Delta dist_i$ je ortogonálna vzdialenosť medzi vybraným bodom a povrchom odhadnutej sféry.

Pri vzdialenostnom filtri, kritérium $r \cdot t_{d[\%]}$ prakticky znamená, že ak odhadnutá sféra má polomer 10 cm, a za prahovú hodnotu t_d sa zvolí hodnota 5, iba body, ktoré sú bližšie k povrchu sféry, ako 0,5 cm (predstavuje 5% z polomeru sféry) sa považujú za vyhovujúce. Príliš vysoká prahová hodnota môže spôsobiť, že do procesu odhadu sa pridajú aj body, ktoré neležia na povrchu danej sféry (napr. šum v mračne, body z okolitých konštrukcií a pod.).

Pri každej iterácii sa postupne vyberajú body z mračna, ktoré spĺňajú kritérium vzdialeností. Následne sa vykoná odhad (resp. fitovanie) (8. krok v pseudokóde – Obr. 2) sféry pomocou všetkých vyhovujúcich bodov, t. j. v každej iterácii sú prepočítané parametre odhadnutej sféry, a do nasledujúcej iterácie sa tieto hodnoty použijú ako vstupné hodnoty. Tým pádom, postupom algoritmu sú odhadnuté parametre stále presnejšie. Tieto dva po sebe idúce kroky algoritmu, extrakcia a odhad, sa vykonávajú, až kým nie sú vybraté všetky body danej sféry, alebo kým nie je splnená niektorá z podmienok na prerušenie výpočtu. V algoritme sa používajú 3 podmienky na prerušenie výpočtu:

- príliš malé množstvo vyhovujúcich bodov pre daný počiatočný bod (5. v pseudokóde)
- parametre sféry sa nekonvergujú v jednotlivých iteráciách (6. v pseudokóde)
- štandardná odchýlka fitovania odhadnutej sféry je príliš vysoká (7. v pseudokóde)

V prípade, ak je splnená aspoň jedna z podmienok, výpočet sa preruší a následne sa začne nový výpočtový cyklus s novým náhodným počiatočným bodom. Validácia, resp. uvedené podmienky prerušenia výpočtu sú potrebné z dôvodu, že výsledok odhadu sféry je priamo závislý od počiatočného bodu a okolitej oblasti. V niektorých prípadoch odhadnuté sféry nemusia reprezentovať charakteristické útvary v mračne bodov. So spomínanými podmienkami sú takéto prípady eliminované.

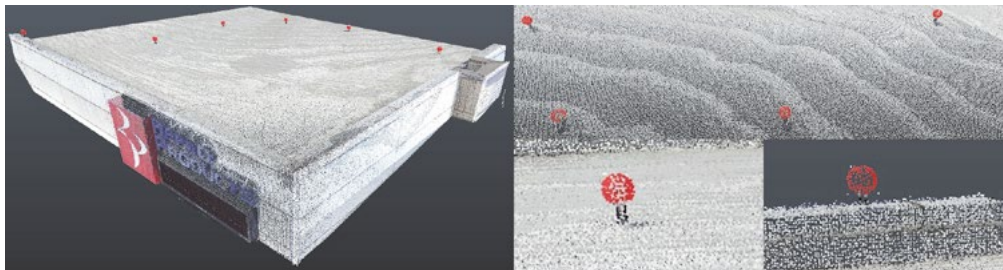
Mračná bodov bez šumu a s malým počtom vybočujúcich bodov konvergujú k „dobre“ odhadnutým sféram už po niekoľkých iteráciách, lenže v prípade zašumených komplexných mračen je potrebné vykonať viaceré iterácie. Z toho dôvodu maximálny počet iterácií je nastavený na 15. Táto hodnota bola určená empiricky na základe testovania niekoľkých mračen bodov s rôznou hustotou, komplexnosťou a zašumením.

Predstavený proces segmentácie sa vykonáva automatizovane, až kým sa nevykoná segmentácia všetkých sfér z mračna bodov. Počet sfér sa zvolí na začiatku algoritmu.

Experimentálne testovanie navrhnutého algoritmu

Verifikácia navrhnutého algoritmu bola vykonaná na mračne bodov priemyselnej budovy, kde na streche budovy boli umiestnené referenčné sféry (Obr. 4). Mračno bodov obsahovalo cca. 2,5 milióna bodov a 6 sférických plôch. Skenovanie bolo vykonané pomocou laserového skenera Trimble TX5 3D. S uvedeným skenerom a s uvážením podmienok počas merania (maximálna vzdialenosť medzi prístrojom a skenovaným objektom, nastavenie

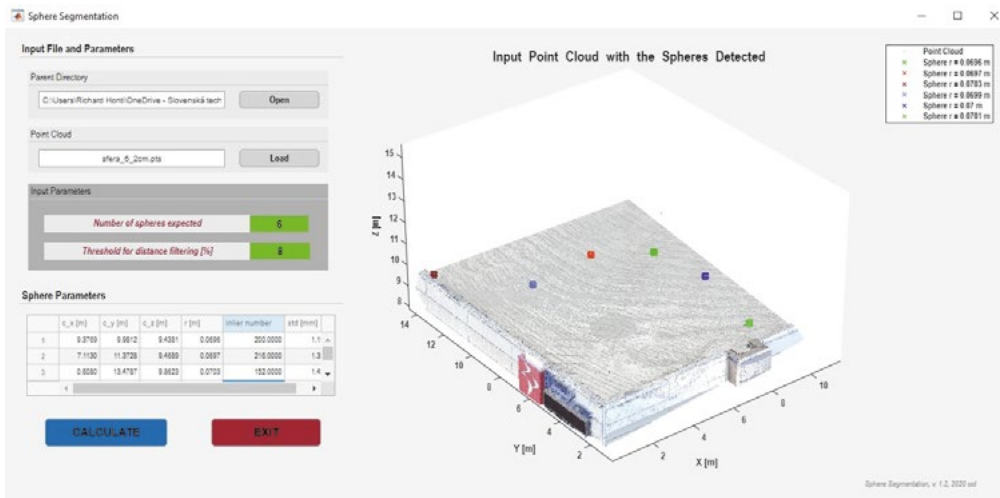
rozlíšenia a kvality skenera, a pod.), presnosť v priestorovej polohe meraného bodu bola nižšia ako 2,5 mm vo všetkých prípadoch. Na verifikáciu výsledkov segmentácie sa určili rozdiely medzi známymi parametrami (polomer) a odhadnutými parametrami (pomocou navrhnutého algoritmu) jednotlivých sfér.



Obr. 1. Mračno bodov priemyselnej budovy.

Implementácia navrhnutého algoritmu do samostatnej aplikácie

Pre automatizáciu a jednoduché vykonanie uvedenej procedúry bola vyhotovená samostatná výpočtová aplikácia „Sphere Segmentation“ v softvéri MATLAB®. Aplikácia bola vyhotovená ako samostatná aplikácia, ale keďže výpočtové jadro prebieha v softvéri MATLAB®, k spusteniu je potrebné mať nainštalovaný Matlab Runtime, ktorý je voľne stiahnuteľný.



Dialogové okno aplikácie.

Dialogové okno aplikácie (Obr. 5) je rozdelené do 3 hlavných častí. Prvá časť „Input File and Parameters“ slúži na načítanie vstupného mračna bodov, a zadanie vstupných hodnôt, ktorými sú počet sfér nachádzajúcich sa v mračne a prahová hodnota pre vzdialenostný filter. V druhej časti je zobrazená tabuľka („Sphere Parameters“), kde sa vypíšu odhadnuté parametre jednotlivých sfér. A treťou časťou je grafické zobrazenie mračna bodov a odhadnutých sfér. V tejto časti je pôvodné mračno bodov zobrazené reálnymi farbami (ak sú dostupné, v prípade nedostupnosti hodnôt RGB vo vstupnom mračne, body sa zobrazia sivou farbou) a počas priebehu aplikácie sú zobrazené jednotlivé segmentované sféry, ktoré sú farebne odlišené. Výsledkom aplikácie sú segmentované mračná jednotlivých sfér uložené do textového súboru pre ďalšie spracovanie a parametre jednotlivých sfér zobrazené v tabuľke dialogového okna aplikácie.

4 ZÁVĚR

Sférické plochy sú často používané geometrické útvary v stavebnom priemysle a majú využitie v rôznych oblastiach. V mnohých aplikáciách sa vyžaduje automatizácia ich detekcie a odhadu ich parametrov z mračna bodov.

V rámci uvedeného príspevku bol navrhnutý robustný algoritmus na automatizáciu identifikáciu a odhad sférických plôch z mračien bodov. Algoritmus dokáže vykonať detekciu a segmentáciu podmnožín bodov prislúchajúcich k jednotlivým sféram v komplexných, rozsiahlych a zašumených mračnách na základe vzdialenostného filtra. Navrhnutý filtračný krok pred samotnou segmentáciou výrazne prispieva k zníženiu času potrebného na výpočet. Validačný krok zabezpečuje, aby boli odhadnuté práve tie charakteristické sféry meraného objektu. Experimentálne testovanie algoritmu na komplexnom mračne bodov, ktoré obsahovalo viac ako 2 milióny bodov je tiež popísané. Pre automatizáciu algoritmus bol implementovaný do samostatnej aplikácie. Iba dve vstupné hodnoty sú potrebné k spusteniu aplikácie, ktorými sú predpokladaný počet sfér v mračne a prahová hodnota pre vzdialenostný filter. Výsledkom aplikácie sú segmentované mračná pre jednotlivé sféry uložené do textového súboru a parametre odhadnutých sfér zobrazené v tabuľke.

Poděkování

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-18-0247.

Použité zdroje

- [1] Honti R., Erdélyi J., Kopáčík A. Plane segmentation from point clouds, *Pollack Periodica*, Vol. 13, No. 2, 2018, pp. 159–171.
- [2] Honti R., Erdélyi J., Kopáčík A. Automation of cylinder segmentation from point cloud data, *Pollack Periodica*, Vol. 14, No. 3, 2019, pp. 189–200.
- [3] Benkó P., Várady T. Segmentation methods for smooth point regions of conventional engineering objects, *Computer-Aided Design*, Vol. 36, No. 6, 2004, pp. 511–523.
- [4] van der Glas M., Vos F. M., Botha C. P., Vossepoel A. M. Determination of position and radius of ball joints, *Proceedings SPIE 4684, Medical Imaging, Image Processing*, San Diego, California, United States, 9 May 2002, pp. 1571–xx.
- [5] Wang L., Cao J., Han C. A calibration algorithm for 3D laser scanner based on spatial sphere, *Journal of Xi'an Jiaotong University*, Vol. 47, No. 4, 2013, pp. 79–85.
- [6] Huang J., Wang Z., Gao J., Huang Y., Towers D. P. High-precision registration of point clouds based on sphere feature constraints, *Sensors*, Vol. 17, No. 1, 2017, pp. 72–xx.
- [7] Schnabel R., Wahl R., Klein R. Efficient RANSAC for point-cloud shape detection, *Computer Graphics Forum*, Vol. 26, No. 2, 2007, pp. 214–226.
- [8] Camurri M., Vezzani R., Cucchiara R. 3D Hough transform for sphere recognition on point clouds, *Machine Vision and Applications*, Vol. 25, No. 7, 2014, pp. 1877–1891.
- [9] Fischler, M. A. a Bolles, R. C., „Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography,“ *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381–395, 1981.
- [10] Hough, P. V. C., „Method and means for recognizing complex patterns“. USA Patent 3069654, 18 12 1962.
- [11] Jekel C. F. Digital image correlation on steel ball (Appendix A), in *Obtaining non-linear orthotropic material*, (diploma Thesis) Stellenbosch, South Africa, Stellenbosch University, 2016, pp. 83–87.

3D MOUNTAIN MAP WITH AUGMENTED REALITY FOR NAVIGATION

Dobrin Petkov*, Nikola Yonov**

*dob_petkov@abv.bg

**yonovnikola@gmail.com

¹University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, 1, Chr. Smirnenski Blvd, 1046 Sofia, Bulgaria

Abstract

During the recent years, mapping of mountain areas has become one of the most discussed topics in cartography. A large number of tourists use mountain markings, indicated by specialized teams, to help them navigate. The Augmented Reality is the inclusion of virtual elements in the vision of the real physical environment for real-time mixed reality creation. This paper describes the technology and the steps which a cartographer has to go through for creating AR map of mountain area. The additional information is in form of a 3D model of the area of Vihren peak, navigation dots on the landscape showing the optimal route and identification signs. The aim of the project is to provide mountaineers with additional information about the navigation to key points and tourist routes.

Key words

3D model, Augmented reality, 3D map, mountain areas, mountain navigation

1 INTRODUCTION

Mountains are one of the most important natural resource of every country. Their ecological and tourist meaning stimulates the development of the new management plans, containing steps for preservation of the natural resources and maximum usage of their potential. A part of the management of these territories is the process of collecting and managing cartographic data and mountain mapping for different purposes - scientific or tourist.

Very often the mountain territories are not friendly for unprepared tourist. An acquaintance with the specific characteristics of a tourist route like difficulty, obstacles, landmarks or help centers, is important part of the preparation for everyone who is going to spend time in the mountain. Orientation involves complex of abilities like estimating slope and passability, calculating time of travel.

Mapping of mountain areas is attended by a set of studies by specialists (cartographers, scientists), which can be divided into the following stages:

- Description of the location/area;
- Source data and materials;
- Mapping methods;
- Results and conclusions.

Mountain maps in traditional paper form are very usable and will still be used for several years in the future. But, technology development like multimedia and interactivity give a chance to find new cartographic representation of mountain regions which would become a very usable products in the future [8].

Visualization of planned areas has been developed by classical, static, modern, flexible, presenting methods, which are increasingly more than 3D and 4D visualization [4]. In the near future people will use more interactive and dynamic visualization of mountain processes and environments. Topics such as interactivity, virtual reality, augmented reality, GIS and database availability, applying logic in cartographic communication and geographic visualization, dominate current research approaches.

The following chapters describe the study area, one of the magnificent peaks in the Pirin Mountains, the created 3D map with specialized software, with data provided by the Directorate of "Pirin National Park" and augmented reality as a method and additional tool for mapping mountain areas and navigation.

2 LITERARY OVERVIEW / DESCRIPTION OF THE PRESENT STATE

The following chapters describe the study area, one of the magnificent peaks in the Pirin Mountains, the created 3D map with specialized software, with data provided by the Directorate of "Pirin National Park" and augmented reality as a method and additional tool for mapping mountain areas and navigation.

Object description

Pirin National Park, Fig. 1, is located in the Pirin Mountain, Southwestern Bulgaria. It's a territory, lying between the "Predel" and "Todorova polyana" territories. It covers 40356 ha and it includes two reserves - "Bayuvi dupki - Dzhindzhiritsa" and "Ulen". The altitude ranges from 1000 m up to 2900 m. More than 50 granite and marble peaks rise with altitude over 2500 m and among them is the highest - Vihren - 2914 m above sea level. Pirin National Park is known for its 35 circuses in which lie about 170 glacial lakes. It was included in the Convention for the Protection of World Cultural and Natural Heritage of UNESCO in 1983.



Fig. 1 Pirin National Park [11].

3D map of the area of Vihren peak

In the last decades 3D maps became a very useful tool of cartography. They give cartographers more possibilities to represent thematic and special information in a way that is understandable to map users [2]. 3D modeling can be defined as creation of a spatial model using special computer software. The built-in 3D model can be viewed from all sides and also be located in one or another environment. There are several steps in processing the information to reach the original 3D model: collecting primary data, preparation in points, polylines, or polygons, and finally creating a 3D model, typically consisting of triangulated network. A data source is any source of information that can be used on the map.

A 3D map of the area of Vihren peak was created, Fig. 3. The basic map represents: terrain relief; hydrography; tourist routes; chalet. The additional content of the map depicts: annotation for the north and scale. The chalet Vihren is located in the research area. Designing a chalet as a virtual object, it is intended to be close to the real object. It was made with measurements, using electronic roulette. Volume scaling is used, which is a simultaneous increase or decrease of object dimensions on the three axes of a local rectangular coordinate system. One scale section corresponds to 20 m. A north-arrow sign is placed on the northwest side of the map.

The purpose of the map is to help users practicing mountaineering and hiking with the introduction of areas and choosing the optimal tourist paths. The 3D dimension of the map makes orientation easily in the research area.

Augmented Reality (AR)

Augmented Reality (AR) is a technology that augments reality with either two or three-dimensional computer generated imagery (CGI), objects and/or information, and allows users to interact with them [1].

AR can be interpreted “as a view of a physical, real world environment whose elements are integrated with computer-generated sensory input” [6]. The objective is to “see and experience the real world mixed with various virtual objects, without losing the sense of reality” [7].

There are four types of AR:

- **Marker-based AR (Image recognition)** - It requires a special visual object like a printed Quick Response (QR) code or any other special signs and images. Marker based applications use a camera on the device to distinguish a marker from any other real world object and it overlays information on top of this marker. Simple patterns (such as a QR code) are used as the markers, because they can be easily recognized and do not require a lot of processing power to read. The AR device also calculates the position and orientation of a marker to position the content.
- **Location-based (Markerless AR)** - It uses the mobile device’s GPS, compass, gyroscope, and accelerometer to provide data based on user’s location. This data then determines what AR content you find or get in a certain area. The wide availability of smartphones and location detection features they provide is in essential significance for the markerless augmented reality technology. It is most commonly used for mapping directions, finding nearby info, and other location-centric mobile applications.
- **Projection-based AR** - It works by projecting artificial light onto real world surfaces. Projection based augmented reality applications allows human interaction by sending light onto a surface from the real world and then sensing the human interaction of that projected light. Detecting the user’s interaction is done by dissociating between an expected projection and the altered projection caused by the user’s interaction. An example of this is The AR Sandbox. This real-time integrated augmented reality system can physically create topography models by shaping real "kinetic" sand [3]. The relief in the sandbox is recalculating according to the depth data, sensed by the camera and processed by the software in every moment. After that it is rendered from the data projector over the sandbox, depicting perfectly matched virtual relief over the sand landscape [10].
- **Superimposition-based AR** - It partially or fully replaces the original view of an object with a newly augmented view of that same object. In superimposition-based augmented reality, object recognition plays a vital role because the application cannot replace the original view with an augmented one if it cannot determine what the object is. An example of this AR is the IKEA augmented reality furniture catalogue. By downloading their app and scanning selected pages in their catalogue, users can place virtual IKEA furniture in their own home with the help of AR.

3 METHODOLOGY

The steps which a cartographer has to go through and that we went through to create and add Augmented Reality are summarized and presented in Fig. 2.

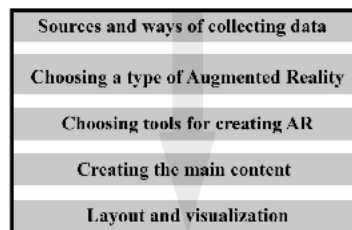


Fig. 2 Creating and adding Augmented Reality technology.

Sources and ways of collecting data

There are unlimited sources for creating an AR like topographic maps, raster images, videos, 3D models, coordinates from geodetic field measurements and more. The created 3D model of the area of Vihren peak is used

as the additional information that is displayed with the AR app. For the creating of the 3D map of the area of Vihren peak the Directorate of “Pirin National Park” provided the following data: contours in vector form (vectorized in 50 m, with sufficient precision for the next steps of working); peak with altitude; rivers; tourist paths and hiking trails.

Choosing a type of Augmented Reality

Location-based AR is the most suitable type of AR for mountain navigation. As mentioned above this type of AR is based on the camera, GPS, accelerometers and other sensors to define the location of the user on the go and all surrounding objects and to display additional information on certain location.

Choosing tools for creating AR

According to Doderer [5]. AR tools can be classified into three categories:

- Low-level libraries - these tools provide only integration with computer vision algorithms, so require strong programming skills to be able to use them.
- High-level programming environments - these tools simplify the development process by providing a supporting environment for building applications.
- Graphical user interfaces (GUI) based development tools - they are in the reach of non-programmers.

GUI-based development tools are very appropriate because they do not require previous knowledge of programming and are generally easier to use and they allow showing 2D, 3D models, photos and videos. But for more elaborate 3D models, animations and simulations in the augmented reality most convenient are Low-level libraries.

Creating the main content

The main content is the overlay information. In this project is used a combination of Marker-based AR and Location-based AR to create a mobile app in help of the mountaineers to provide them with additional information about the navigation to key points and tourist routes. As mentioned above Marker-based AR use image recognition capabilities to recognize images and overlay information on top of this image. Markers are labels that contain a colored or black and white pattern that is recognized by the AR application through the camera of the device. In this project the created 3D map is used as marker to display the created 3D models as additional information. The vector data provided from the Directorate of “Pirin National Park” and the detailed 3D model are used to determine the exact location of each dot of the optimal route from the hut to the Vihren peak. These navigation dots and identification signs of Vihren hut and of Vihren peak are the main content of the location-based AR. The dots are displayed on the landscape through the whole route and the identification signs are displayed above the hut and the peak, with the exact elevation and the distance to each of them measured in walking time.

Layout and visualization

- Matching all elements
- Selection of projection, scale, scene and range
- Additional effects and animations
- Rendering
- Final product – AR mobile app

In this project the navigation app is created using Unity3D in combination with Vuforia for the Marker-based AR and in combination with AR+GPS Location for the Location-based AR part of the app.

4 RESULTS

Created 3D map

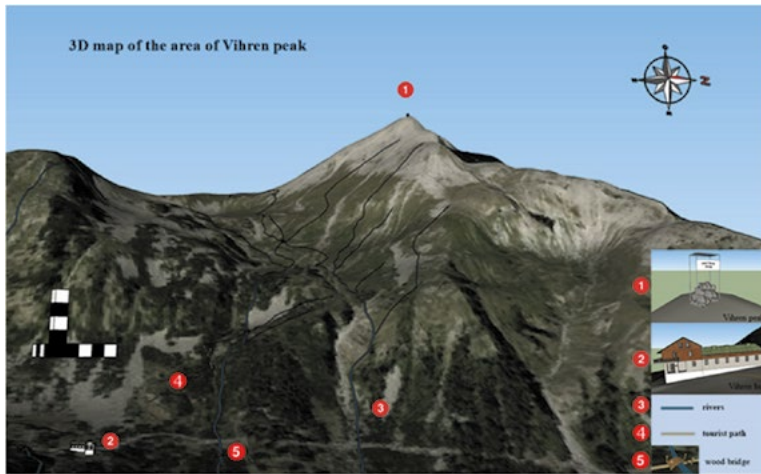


Fig. 3 3D map of the area of Vihren peak.

AR mobile app



Fig. 4 Displaying the location-based AR information – navigation dots and identification signs of the Vihren hut and Vihren peak (concept).

5 DISCUSSION

In Google Play Store there are a lot of applications for mountaineers. ViewRanger is one of all, which is a mobile application for people who love the outdoors, which discovers maps, trail guides, and powerful GPS navigation features. There is an availability of augmented reality, which for navigation is “allowing you to see beyond the edge of the map”. The advantages of this product are that this app allows you to record and follow a track simultaneously, worldwide access, all-time synchronisation, amazing customer service, offline use and three

dimensional fly-through. The disadvantages are that you need to pay for other routes or even maps covering other parts of the world, hard to use and poor printing options. Deeper researches on similar apps clearly expose a room for improvement. Eliminating the “bad sides” of those products and combining the “good ones” can contribute us in a greater way.

6 CONCLUSION

In near future a research with volunteers mountaineers and with students from University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy in Sofia will be conducted to explore the perception of the new technology. During a period of a week, several analyses will be made and different tasks will be solved by the students with the help of non-wearable devices – smartphones and tablets. Several variables such as the time to reach the final destination, easier orienteering and perceiving will be measured. The specific focus will be the potential use of AR for mountain navigation.

Making an AR app is an extremely complex and labour-intensive process. AR has a rich application and can be of benefit to many different users. The challenges of creating and adding Augmented Reality App for mountain navigation are still not only gathering data, modeling, design and visualization, but to use AR in more useful way, to become a strong tool for navigation. With this work we proposed a method of using AR as a kind of new technology in cartography and show a way how we can provide mountaineers with additional information about the navigation to key points and tourist routes.

Acknowledgement

The authors would like to thank prof. Temenoujka Bandrova for her comments and to collaborators who provided the data used in this work.

References

- [1] Azuma, Ronald (1997). "A Survey of Augmented Reality." Teleoperators and Virtual Environments.
- [2] Bandrova T. Bonchev St. (2010) 3D Maps for Internet Application, 3rd ISDE Digital Earth Summit, CD Proceedings, Nessebar, Bulgaria, 2010.
- [3] Bandrova T, M. Kouteva, L.Pashlova, D. Savova and S. Marinova. (2015). Conceptual Framework for Educational Disaster Centre save The Children Life. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-3/W3, 28 Sep-03Oct 2015. La Grande Motte, France.
- [4] Buckley A., Hurni L., Kriz K., Patterson, T., Olsenholler J., Cartography and visualization in mountain geomorphology, January 2004.
- [5] Doder, J.M., Mota, J.M., Ruiz-Rube, I. and Molina, D. (2017). Learning Augmented Reality in the classroom.
- [6] Freina, L., & Ott., M. (2015). A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education: State Of The Art and Perspectives. In Proceedings of eLearning and software for education (eLSE) (pp. 133-141). Bucharest, Romania: ditura Universității Naționale de Apărare „Carol I”.
- [7] Persefoni, K., & Tsinakos, A. (2015). Use of Augmented Reality in terms of creativity in School learning. In Make2Learn 2015 workshop at ICEC'15.
- [8] Petrovic, D., Three-dimensional mountain map, 2001, University of Ljubljana.
- [9] Savova D., Bandrova T., 3D Mapping of Mountain Territories - Virtual Visualization by 3D Symbol System, 5th Jubilee International Conference on Cartography and GIS - Proceedings Vol.1, June 2014.
- [10] Savova D., AR Sandbox in Educational Programs for Disaster Response, Proceedings, 6 th International Conference on Cartography and GIS, 13-17 June 2016, Albena, Bulgaria.
- [11] Natural World Heritage Sites. Pirin National Park [online] Available at: <https://naturalworldheritagesites.org/sites/pirin-national-park>

VLIV PREKALIBRACE KAMERY DJI FC300S NA PŘESNOST FOTOGRAMMETRICKÝCH VÝSLEDKŮ

EFFECT OF DJI FC300S PRE-CALIBRATION ON THE ACCURACY OF PHOTOGRAMMETRIC RESULTS

Jakub Nosek^{*1}, Petr Kalvoda¹, Michal Kuruc¹, Tomáš Volařík¹, Petra Stránská¹

^{*}nosek.j@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie, Veveří 331/95, Brno

Abstrakt

Snímkování pomocí dálkově pilotovaných leteckých systémů (RPAS) je v současné době nezastupitelnou součástí fotogrammetrie. Nízkonákladové RPAS využívají levné neměřické kamery, u kterých je třeba kvalitně určovat prvky vnitřní orientace v celé ploše snímku. Tento článek se zabývá určením prvků vnitřní orientace kamery DJI FC300S, která je součástí RPAS DJI Phantom 3 Advanced a zhodnocením využitelnosti prekalibrace této kamery. Bylo ověřeno, že prvky vnitřní orientace této kamery jsou v čase stabilní a že prekalibrace má významný přínos pro zlepšení přesnosti výsledků fotogrammetrie.

Klíčová slova

RPAS, kalibrace, prvky vnitřní orientace, DJI Phantom 3

Abstract

Imaging using remotely piloted aircraft systems (RPAS) is currently an irreplaceable part of photogrammetry. Low-cost RPAS uses cheap non-metric cameras for which it is necessary to determine the quality of the interior orientation parameters in the entire area of the image. This paper deals with the determination of the interior orientation parameters of the DJI FC300S camera, which is a part of the RPAS DJI Phantom 3 Advanced, and the evaluation of the usability of the pre-calibration of this camera. The interior orientation parameters have been found stable over time, and the pre-calibration has a significant contribution to improving the accuracy of the photogrammetry results.

Key words

RPAS, calibration, interior orientation parameters, DJI Phantom 3

1 ÚVOD

RPAS jsou v současné době využívány k celé řadě geodetických a fotogrammetrických aplikací, například pro mapovací účely, tvorbu ortofotomap a 3D modelů budov a území. Geometrická přesnost výsledných produktů je jednou z klíčových vlastností, přičemž závisí na řadě faktorů. Obecně lze říci, že přesnost výsledných fotogrammetrických produktů (bodových mračen, ortofotomap, 3D modelů) závisí na kvalitě snímků, geometrii snímkování, vličování, charakteristice snímkaných objektů a na použitých algoritmech.

Kvalita snímků je dána především použitým typem kamery. S tímto faktorem úzce souvisí také kvalita určení prvků vnitřní orientace (parametrů kamery). Běžně využívané RPAS obsahují levné kamery (z pohledu fotogrammetrie neměřické) u kterých nejsou výrobcem dopředu deklarovány prvky vnitřní orientace a někteří autoři uvádí, že tyto prvky vnitřní orientace jsou nestabilní [1], [2]. Geometrie snímkování souvisí s účelem, pro jaký jsou snímky pořizovány. Běžně bývají využívány svislé snímky (ve směru nadiru) a snímky šikmé. Pro modelování 3D objektů jsou vhodnější snímky šikmé, které umožňují zvýšit přesnost výsledných produktů a hustotu bodových mračen [3]. Další faktor, který ovlivňuje přesnost výsledného modelu je překrytí snímků. Při využití RPAS bývá doporučována hodnota podélného a příčného překrytu minimálně 70 %. Vysoké hodnoty překrytí snímků umožňují algoritmům použitým při tvorbě modelu odstranit defekt způsobený velkými rotacemi mezi snímky v malých výškách [4]. Významným faktorem, který ovlivňuje přesnost výsledných produktů snímkování RPAS je vličování, zejména přesnost, identifikovatelnost, geometrická konfigurace a relativní počet

použitých vličovacích bodů (Ground Control Points – GCP). Relativním počtem vličovacích bodů rozumíme poměr počtu vličovacích bodů na počet snímků.

2 KALIBRACE NEMĚŘICKÝCH KAMER

Výhoda neměřických kamer užitých v rámci RPAS je jejich cenová dostupnost a malá hmotnost. Kvalita snímačů a optiky těchto kamer je výrazně horší než u profesionálních a měřických kamer. Tato vlastnost se projevuje v zejména velkými hodnotami radiální a tangenciální distorze na okrajích snímku. Využití těchto neměřických kamer je podmíněno kvalitním modelováním průběhu distorzí v celé ploše snímku.

Prvky vnitřní orientace lze určovat před samotným snímkovacím letem (pre-calibration) v laboratoři, případně pomocí 3D kalibračního pole, které obsahuje velké množství vličovacích bodů. S ohledem na náročnost přípravy kalibračních terčů a vličovacích bodů (správná geometrie, přesnost zaměření) bývají tyto kalibrace časově a finančně náročné. Druhou možností, jak určovat prvky vnitřní orientace kamer, je využití technik Structure from Motion (SfM), kdy jsou hodnoty prvků vnitřní orientace odhadnuty v rámci blokového vyrovnání paprskových svazků (self-calibration) [5]. V takovém případě je potřeba zajistit, aby letový plán snímkování zajistil robustnost řešení při následném zpracování snímků a aby bylo snímkování připojeno na dostatečný počet vličovacích bodů [6]. Pro dosažení přesných výsledků je obecně doporučováno kalibrovat kamery RPAS před samotným snímkováním (prekalibrace), protože nelze vždy zajistit ideální geometrii letových řad a tvorba velkého počtu vličovacích bodů může být značně finančně náročná [7], [8].

S ohledem na současné možnosti výpočetní techniky lze provést i kombinaci předchozích kalibračních metod, kdy jsou snímky pořízeny v rámci jednoduchého projektu, který zajišťuje robustnost řešení a jednoznačnost přiřazení klíčových bodů. Prvky vnitřní orientace lze pak určit metodou self-calibration a v rámci rozsáhlejšího projektu je použit jako dané, čímž se zajistí vyšší robustnost a rychlost výpočtů. Výslednými hodnotami kalibrace kamer jsou prvky vnitřní orientace – ohnisková vzdálenost c , poloha hlavního snímkového bodu (x_0, y_0) a koeficienty matematických modelů popisujících distorze objektivu.

Distorze objektivu δ_x a δ_y lze pomocí zkreslených snímkových souřadnic x_d a y_d vyjádřit jako

$$\begin{aligned}x_d &= x + \delta_x(x, y), \\y_d &= y + \delta_y(x, y),\end{aligned}\tag{1}$$

kde x a y jsou nezkraslené snímkové souřadnice a $\delta_x(x, y)$, $\delta_y(x, y)$ jsou zkreslení ve směru x a y . Často používaný matematický model pro běžné typy objektivů se skládá z dílčích modelů popisujících radiální a tangenciální složky zkreslení. Radiální složku zkreslení lze vyjádřit jako

$$\begin{aligned}\delta_{x,r}(x, y) &= x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots), \\ \delta_{y,r}(x, y) &= y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots),\end{aligned}\tag{2}$$

kde k_1, k_2, k_3 jsou koeficienty modelu radiální distorze a r je vzdálenost bodu (x, y) od středu radiálního zkreslení [9]. Tangenciální složka distorze objektivu je způsobena nepřesnou centrací jednotlivých složek a její směr je kolo na distorzi radiální. Tangenciální složku distorze lze zapsat jako

$$\begin{aligned}\delta_{x,t}(x, y) &= 2p_2 xy + p_1(r^2 + 2x^2), \\ \delta_{y,t}(x, y) &= 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2y^2),\end{aligned}\tag{3}$$

kde p_1 a p_2 jsou koeficienty modelu tangenciální distorze [10].

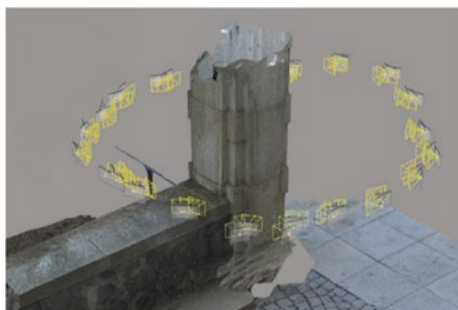
3 KALIBRACE KAMERY DJI FC300S

RPAS DJI Phantom 3 Advanced je vybaven neměřickou kamerou DJI FC300S, výrobcem uvedené parametry jsou v Tab. 1. Výrobce programu Bentley ContextCapture, který byl využit pro zpracování fotogrammetrických dat, doporučuje před zpracováním dat z rozsáhlejšího snímkování provést kalibraci na malém projektu, který obsahuje co nejméně nejednoznačností. Doporučené je snímkování dobře texturovaného objektu, jehož textura umožní snadnou automatickou detekci spojovacích bodů [11].

Pro kalibrační snímkování byl využit sloup v areálu Fakulty stavební, VUT v Brně. Snímkování bylo prováděno v tzv. „robustní“ konfiguraci, kdy jsou snímky pořízeny kolem celého objektu. Tato konfigurace umožňuje kvalitnější spojení snímků při aerotriangulaci. Sloup byl snímkován z celkem 21 postavení (Obr. 1), přičemž na každém byly pořízeny 3 vodorovné a 3 svislé snímky. Různá orientace snímků je vhodná pro kvalitnější určení polohy hlavního snímkového bodu.

Tab. 1 Základní parametry kamery DJI FC300S.

Parametr	Hodnota
Typ snímače	1 : 2,3 " CMOS
Rozměry snímače	6,16 × 4,62 mm
Rozlišení kamery	4000 × 3000 px
Ohnisková vzdálenost	3,61 mm



Obr. 1 Pozice kamery při kalibračním snímání.

Prvky vnitřní orientace neměřických kamer mohou být v čase proměnlivé. Stabilita těchto prvků může být závislá i teplotě kamery. Z tohoto důvodu byly provedeny 2 nezávislé snímání ve dnech 15. 9. 2020 (28 °C) a 8. 10. 2020. (14 °C), přičemž byla v obou případech dodržena stejná konfigurace snímkových postavení. V obou dnech bylo pořízeno přibližně 115 snímků.

4 SNÍMKOVÁNÍ V AREÁLU ADMAS

Pro snímkování byl zvolen areál výzkumného centra AdMaS. V rámci areálu bylo vytvořeno testovací pole, které bylo na komunikacích a budovách signalizováno šachovnicovými terči o rozměru 20 cm × 20 cm. Testovací pole bylo zaměřeno pomocí totální stanice Trimble S8 HP a GNSS aparatury Trimble R8s. Souřadnice bodů testovacího pole byly určeny na základě vyrovnání geodetické sítě metodou nejmenších čtverců. Hodnota aposteriorní 3D směrodatné odchylky vyrovnaných bodů testovacího pole činí 2 mm. Pro další zpracování fotogrammetrických dat lze souřadnice těchto bodů považovat za referenční (bezchybné).

Snímkování v areálu výzkumného centra AdMaS proběhlo 21. 8. 2020. Snímkováno bylo pomocí RPAS DJI Phantom 3 Advanced. Při snímkování byla hodnota parametru ISO nastavena na 100 a expoziční čas byl nastaven na hodnotu 1 : 80 s. Pro plánování letu a samotné snímkování byla využita aplikace Pix4Dcapture verze 4.9.0, která v průběhu letu RPAS řídila. Snímkováno bylo pomocí šikmých snímků a v konfiguraci zvané „double grid“ (snímkování objektu ze 4 směrů). Podrobné parametry snímkování jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2 Parametry snímkování v areálu výzkumného centra AdMaS.

Parametr	Hodnota
Výška letu	30 m
Podélný překryt	80 %
Příčný překryt	70 %
Úhel záběru	50°
Počet snímků	163
Letový čas	11 min

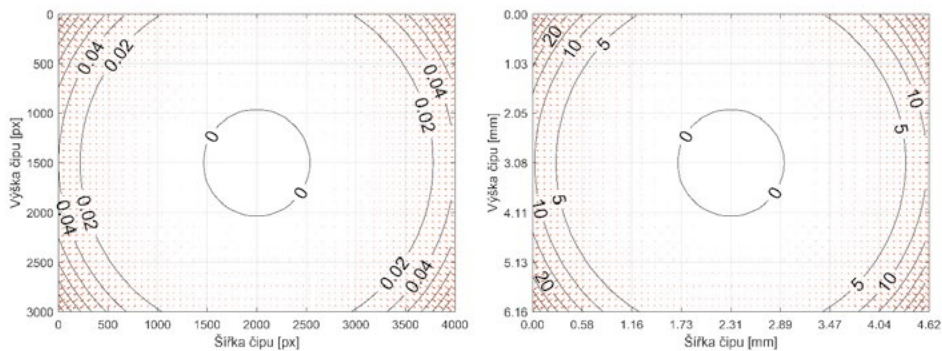
Zpracování v programu Bentley ContextCapture zahrnovalo automatické generování klíčových bodů, jejich automatizované „mezisnímkové“ přiřazení (navazovací body) a blokové vyrovnání paprskových svazků. Vlícovací a kontrolní body byly ve snímcích identifikovány manuálně.

5 VÝSLEDKY

Prvky vnitřní orientace kamery DJI FC300S vypočtené na základě kalibračního snímkování (prekalibrace) jsou uvedené v Tab. 3. Z výsledků kalibrace je patrné, že prvky vnitřní orientace kamery DJI FC300S jsou v čase relativně stabilní. V dalším zpracování byly použity průměrné hodnoty prvků vnitřní orientace ze dnů 15. 9. 2020 a 8. 10. 2020.

Tab. 3 Vybrané výsledky kalibrace kamery DJI FC300S.

Parametr	15. 9. 2020	8. 10. 2020	Průměr
Ohnisková vzdálenost	3,58682 mm	3,58703 mm	3,58693 mm
x_0	2013,59 px	2015,58 px	2014,59 px
y_0	1475,32 px	1475,99 px	1475,66 px
k_1	$-5,603 \cdot 10^{-3}$	$-5,565 \cdot 10^{-3}$	$-5,584 \cdot 10^{-3}$
k_2	$-1,398 \cdot 10^{-4}$	$-11,808 \cdot 10^{-4}$	$-6,603 \cdot 10^{-4}$
k_3	$1,222 \cdot 10^{-2}$	$1,300 \cdot 10^{-2}$	$1,261 \cdot 10^{-2}$



Obr. 2 Radiální distorze kamery DJI Phantom 3 Advanced v pixelech (vlevo); v mikrometrech (vpravo).

Snímky pořízené během letu ve výzkumném centru AdMaS byly zpracovány ve dvou základních variantách. V první variantě byly prvky vnitřní orientace určeny na základě blokového vyrovnání paprskových svazků při aerotriangulaci (self-calibrated). V druhé variantě byly využity výsledky prekalibrace (pre-calibrated).

Tab. 4 Přesnost variant v úrovni vřícovacích bodů (terénního reliéfu).

Varianta	SE [m]	SN [m]	SU [m]
3 GCP (pre-calibrated)	0,008	0,012	0,012
6 GCP (pre-calibrated)	0,007	0,009	0,015
9 GCP (pre-calibrated)	0,009	0,015	0,013
3 GCP (self-calibrated)	0,007	0,008	0,015
6 GCP (self-calibrated)	0,005	0,007	0,011
9 GCP (self-calibrated)	0,005	0,006	0,011

Tab. 5 Přesnost variant 16 metrů nad úrovní vřícování (v úrovni střech).

Varianta	SE [m]	SN [m]	SU [m]
3 GCP (pre-calibrated)	0,047	0,040	0,035
6 GCP (pre-calibrated)	0,050	0,040	0,037
9 GCP (pre-calibrated)	0,047	0,036	0,033
3 GCP (self-calibrated)	0,054	0,044	0,120
6 GCP (self-calibrated)	0,053	0,044	0,114
9 GCP (self-calibrated)	0,054	0,042	0,115

Jak již bylo zmíněno, snímkování založené na určení prvků vnitřní orientace v průběhu blokového vyrovnání paprskových svazků je náchylné na špatnou geometrii snímkování. Z tohoto důvodu byly otestovány varianty, kdy byly k vličovacím bodům v úrovni terénu přidány i 3 vličovací body na střeše. Výsledky této varianty jsou uvedeny v Tab. 6.

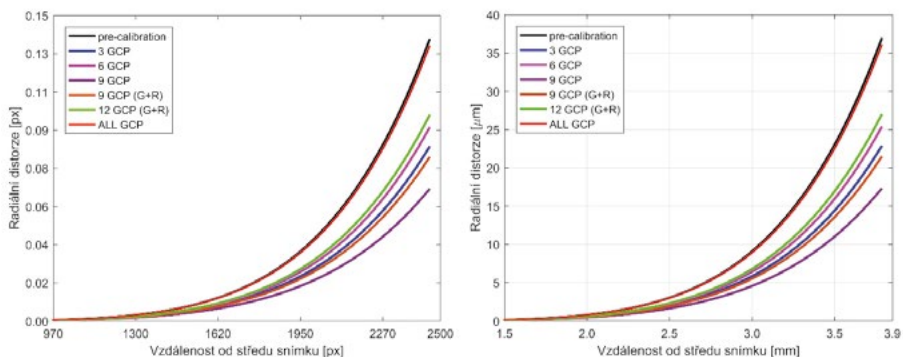
Tab. 6 Přesnost variant v úrovni střech po přidání vličovacích bodů na střechu.

Varianta	s_E [m]	s_N [m]	s_U [m]
6+3 GCP (pre-calibrated)	0,065	0,032	0,028
9+3 GCP (pre-calibrated)	0,066	0,034	0,032
6+3 GCP (self-calibrated)	0,069	0,032	0,058
9+3 GCP (self-calibrated)	0,073	0,040	0,060

Vybrané prvky vnitřní orientace kamery DJI FC300S vypočtené na základě blokového vyrovnání paprskových svazků v rámci různých variant vličování jsou uvedeny v Tab. 7. Varianta „ALL“ byla vypočtena na základě 31 vličovacích bodů a lze tedy předpokládat, že prvky vnitřní orientace vypočtené touto variantou se nejvíce blíží jejich skutečným hodnotám. Hodnoty radiálního zkreslení z jednotlivých variant jsou zobrazeny na Obr. 3.

Tab. 7 Vybrané prvky vnitřní orientace kamery DJI FC300S vypočtené z různých variant vličování.

Varianta	c	x_0	x_0	k_1	k_2	k_3
3 GCP	3,604 mm	2012,69 px	1456,63 px	$-7,091 \cdot 10^{-3}$	$74,578 \cdot 10^{-4}$	$7,277 \cdot 10^{-3}$
6 GCP	3,603 mm	2012,74 px	1456,49 px	$-5,910 \cdot 10^{-3}$	$54,208 \cdot 10^{-4}$	$5,421 \cdot 10^{-3}$
9 GCP	3,604 mm	2013,14 px	1455,58 px	$-8,366 \cdot 10^{-3}$	$109,124 \cdot 10^{-4}$	$5,160 \cdot 10^{-3}$
6 + 3 GCP	3,595 mm	2013,14 px	1464,97 px	$-8,751 \cdot 10^{-3}$	$84,055 \cdot 10^{-4}$	$6,751 \cdot 10^{-3}$
9 + 3 GCP	3,593 mm	2012,35 px	1465,79 px	$-7,120 \cdot 10^{-3}$	$49,035 \cdot 10^{-4}$	$8,859 \cdot 10^{-3}$
ALL	3,586 mm	2011,60 px	1469,31 px	$-5,868 \cdot 10^{-3}$	$8,622 \cdot 10^{-4}$	$8,859 \cdot 10^{-3}$
prekalibrace	3,587 mm	2014,59 px	1475,66 px	$-5,584 \cdot 10^{-3}$	$-6,603 \cdot 10^{-4}$	$1,261 \cdot 10^{-2}$



Obr. 3 Porovnání radiální distorze z různých variant určení prvků vnitřní orientace.

6 ZÁVĚR

Na základě výsledků kalibrací kamery DJI FC300S bylo ověřeno, že prvky vnitřní orientace této kamery jsou v čase stabilní, což je v souladu s jinými publikovanými pracemi [12]. Významnější hodnoty radiálního zkreslení u snímků z kamery DJI FC300S jsou pouze na okrajích snímků, což ukazuje na relativně dobrou kvalitu kamery. Přesnost výsledků byla analyzována na základě rozdílů referenčních souřadnic bodů testovacího pole, které byly určeny vyrovnáním geodetické sítě metodou nejmenších čtverců, a souřadnic bodů testovacího pole určených na základě výsledků aerotriangulace.

Výsledky dokazují, že nejlepší přesnosti je dosaženo s využitím prekalibrace. Při využití kalibrace v rámci blokového vyrovnání paprskových svazků je možné podobné přesnosti dosáhnout pouze v případě, kdy kontrolní body (vyhodnocovaná oblast) leží ve stejné výškové úrovni, jako body na které bylo vličováno.

Pokud kontrolní body leží cca 16 metrů nad úrovní vličování (na střeších budov), poskytnete prekalibrace až trojnásobně zvýšení přesnosti výškové složky. Mírného zvýšení přesnosti výškové složky lze bez využití prekalibrace dosáhnout pomocí vličování v různých výškových úrovních. V porovnání s vlivem prekalibrace je však tento rozdíl bezvýznamný.

Přímé porovnání prvků vnitřní orientace vypočtených bez prekalibrace prokazuje vliv počtu a geometrické konfigurace vličovacích bodů. Výsledky srovnatelné s prekalibrací jsou dosaženy pouze v případě, kdy bylo všech 31 bodů použito jako vličovací. Tak husté vličování však není pro většinu praktických aplikací efektivní a jako optimální vzhledem k časové a ekonomické náročnosti se jeví právě využití prekalibrace.

Na výsledky uvedené v tomto článku budou navazovat další kalibrace kamery DJI FC300S a ověření přínosu kalibrací na větším území, kdy budou vyhodnocovány nejenom odchylky na kontrolních bodech, ale bude zhodnocena i přesnost výsledných produktů fotogrammetrie – mračen bodů a 3D modelů.

Poděkování

Článek vznikl v rámci řešení projektu Specifického výzkumu VUT v Brně FAST-S-19-5704.

Použité zdroje

- [1] Hastedt H., Luhmann T. Investigations on the Quality of the Interior Orientation And Its Impact in Object Space for UAV Photogrammetry. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015;XL-1/W4:321-328.
- [2] Šafář V. Porovnání přesnosti a efektivitu měřických metod určení objemu při povrchovém dobývání v návaznosti na novelizaci vyhlášky Českého báňského úřadu č. 435/92 Sb. [Disertační práce]. 2017.
- [3] Vacca G, Dessì A, Sacco A. The Use of Nadir and Oblique UAV Images for Building Knowledge. ISPRS International Journal of Geo-Information [Internet]. 2017 [cited 2020Nov.09];6(12). Available from: <http://www.mdpi.com/2220-9964/6/12/393>
- [4] Li J, Huang D, Yang P, Heled J, Yuan A. Inspection method of images' overlap of UAV photogrammetry based on features matching. MATEC Web of Conferences [Internet]. 2018 [cited 2020Nov.09];173. Available from: <https://www.matec-conferences.org/10.1051/mateconf/201817302022>
- [5] Fawcett D, Azlan B, Hill TC, Kho LK, Bennie J, Anderson K. Unmanned aerial vehicle (UAV) derived structure-from-motion photogrammetry point clouds for oil palm (*Elaeis guineensis*) canopy segmentation and height estimation. International Journal of Remote Sensing [Internet]. 2019Oct.02 [cited 2020Nov.10];40(19):7538-7560. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161.2019.1591651>
- [6] Harwin S, Lucieer A, Osborn J. The Impact of the Calibration Method on the Accuracy of Point Clouds Derived Using Unmanned Aerial Vehicle Multi-View Stereopsis. Remote Sensing [Internet]. 2015 [cited 2020Nov.10];7(9):11933-11953. Available from: <http://www.mdpi.com/2072-4292/7/9/11933>
- [7] Oniga V-E, Pfeifer N, Loghin A-M. 3D Calibration Test-Field for Digital Cameras Mounted on Unmanned Aerial Systems (UAS). Remote Sensing [Internet]. 2018 [cited 2020Nov.10];10(12). Available from: <http://www.mdpi.com/2072-4292/10/12/2017>
- [8] Garcia MVY, Oliveira HC. THE INFLUENCE OF GROUND CONTROL POINTS CONFIGURATION AND CAMERA CALIBRATION FOR DTM AND ORTHOMOSAIC GENERATION USING IMAGERY OBTAINED FROM A LOW-COST UAV. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences [Internet]. 2020 [cited 2020Nov.10];V-1-2020:239-244. Available from: <https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/V-1-2020/239/2020/>
- [9] Wang J, Shi F, Zhang J, Liu Y. A new calibration model of camera lens distortion. Pattern Recognition [Internet]. 2008 [cited 2020Nov.10];41(2):607-615. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0031320307003020>
- [10] OpenCV. Open Source Computer Vision Library. 2015.
- [11] Reality Modeling Drone Capture Guide, 2018. Bentley Advancing Infrastructure.
- [12] Cramer M, Przybilla H-J, Zurhorst A. UAV CAMERAS: OVERVIEW AND GEOMETRIC CALIBRATION BENCHMARK. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences [Internet]. 2017 [cited 2020Nov.10];XLII-2/W6:85-92. Available from: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-2-W6/85/2017/>

VYUŽITÍ RPAS A SFM FOTOGRAMMETRIE V ZASTAVĚNÝCH OBLASTECH

USAGE OF RPAS AND SFM PHOTOGRAMMETRY IN URBAN AREAS

Miroslava Kubičková¹, Jakub Nosek¹, Richard Kratochvíl¹, Jiří Vondrák¹

*xssucha@vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95 Brno

Abstrakt

Jednou z praktických geodetických úloh je určení sklonu a výměr plochých střech pro účely odtoku srážkových vod střech. Návrh odvodnění vychází z přesného zaměření účinné plochy střech. V zastavěných oblastech lze pro přesné zaměření využít RPAS. V článku se autoři zaměřují na analýzu přesnosti dat pořízených RPAS a SfM fotogrammetrie v oblastech s vysokou nehomogenitou GSD. Geometrická kvalita takto pořízených prostorových dat je závislá na řadě faktorů, mezi nejvýznamnější se řadí letový plán, kvalita kamery a její kalibrace, SfM algoritmus, zvolená strategie pro georeferencování a charakter snimané oblasti. V rámci tohoto článku je analyzován vliv vybraných faktorů na kvalitu výpočtu SfM, Pro analýzu jsou využity nezávislé kontrolní body umístěné v různých výškových úrovních.

Klíčová slova

Vzdáleně pilotovaný letecký systém (RPAS), Structure from Motion (SfM), vřícovací bod (VB), kontrolní bod (CP)

Abstract

One of the practical geodetic tasks is to determine the flat roofs slope and area. The drainage design is based on the precise measurement of the effective roof area, RPAS can be used for those measuring. In the article, the authors focus on the accuracy analysis of the RPAS data and SfM photogrammetry in the urban areas with high GSD inhomogeneity. The geometric quality of spatial data obtained in this way depends on a number of factors. The most important is the flight plan, quality of the camera and its calibrations, used software, georeferencing strategy and character of scanned area. The influence of these selected factors on the SfM calculation quality is analysed. Independent control points, which are place in different height levels are used for the analysis.

Key words

Remotely piloted aircraft system (RPAS), Structure from Motion (SfM), ground control point (VB), control point (CP)

1 ÚVOD

Nutným krokem ke zmírnění sucha a povodní je zamezení odvodňování měst a krajiny. Zadržování vody je řešeno pomocí různých retenčních technologií. Přesné určení odtoku srážkových vody je klíčovým krokem pro efektivní plánování. Výpočet odtoku srážkových vod závisí na tvaru střechy, ploše střechy a u plochých střech na přesném určení sklonu střech. Vhodným nástrojem pro zaměřování střech jsou vzdáleně pilotované letecké prostředky RPAS, které umožňují efektivní a přesné zaměření prostorové polohy střešních ploch. S rozvojem počítačového vidění došlo ke vzniku řady fotogrammetrických softwarů založených na SfM algoritmu. Tyto softwary mimo jiné umožňují rychlou a efektivní tvorbu 3D modelu objektu. Geometrická přesnost je silně závislá na mnoha faktorech mezi nejdůležitější jistě patří letový plán, kvalita kamery, SfM algoritmus a strategie georeferencování. Různé přístupy georeferencování z hlediska počtu a rozmístění vřícovacích bodů (VB) vstupujících do výpočtu svazkového vyrovnání jsou testovány separátně pomocí nezávislých kontrolních bodů, tj. bodů, které nevstupují do výpočtu svazkového vyrovnání. Tyto kontrolní body (CP) jsou umístěny na střechách nebo na terénu a jsou stejně jako vřícovací body (VB) uměle signalizovány. Pro výpočet je využito třech výpočetních softwarů založených na SfM algoritmu. Pro testování je využito třech snímkových sad s různou výškou letu. Cílem práce je analyzovat vliv počtu vřícovacích bodů vzhledem k použitému výpočetnímu softwaru a výšce letu na přesnost

výpočtu SfM. Analyzovány budou odchylky na kontrolních bodech separátně pro body v různých výškách (střechy, terén).

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

V České republice se aktuálně testování přesnosti fotogrammetrického snímkování legislativně opírá o Návod na obnovu katastrálního operátu a převod [1]. Tento návod se ovšem popisuje fotogrammetrické metody s využitím kalibrovaných měřických kamer nesených letouny s posádkou. Návod dosud nebyl doplněn o specifikaci využití fotogrammetrie z RPAS, nelze ho tedy využít pro takto pořizované fotogrammetrické výstupy. Státní pozemkový úřad vydal osvědčení pro Metodiku určení prostorových objektů pro komplexní pozemkové úpravy s využitím systému bezpilotních prostředků [3]. Tato metodika se podrobně zabývá využitím UAS v pozemkových úpravách s kvalitou výsledných dat odpovídající třídě přesnosti 3 dle ČSN 013410. V mnoha dalších oborech lidské činnosti je ovšem určení prostorové polohy ve třetí třídě přesnosti nedostatečné a jsou vyžadovány fotogrammetrické výstupy s vyšší kvalitou.

Jedním ze zásadních vstupů ovlivňujících kvalitu dat je kvalita použité kamery a kvalita kalibrace. Kalibrační parametry kamery jsou v moderních programových nástrojích určovány v rámci výpočtu SfM konkrétního projektu přímo nebo lze využít kalibračních parametrů vypočtených pomocí výrazně strukturovaného a členitého objektu či pole. Takto vypočtené kalibrační parametry lze následně vložit do projektu jako vstupní hodnoty neměnné nebo k vyrovnání. Kalibrační kamery nesených RPAS s využitím vhodného kalibračního pole se v ČR zabývá Ing. Václav Šafář Ph.D. Ve své disertační práci [7] autor uvádí tři existující kalibrační základny na území ČR, a to základna Brno – Líšeň (bývalé společnosti GEODIS), základna v prostoru dolů Tušimice a základna na úseku dálnice D11 zřízená společností Eurovia. Ani jedna z těchto kalibračních základen není aktuálně pro kalibraci RPAS vhodná. Vhodná kalibrační základna musí být dostupná, dostatečně výškově členitá, VB musí být vhodně stabilizovány a signalizovány, ale zároveň chráněny před provozem na pozemních komunikacích. Základna by měla umožňovat snímkování v rozsahu GSD 1–12 cm.

Vliv počtu, rozložení vřícovacích bodů a velikostí GSD na kvalitu fotogrammetrických dat je analyzováno v [6]. Testování je realizováno pomocí kalibračního pole o velikosti 2500 ha. Pole je složeno ze 100 vřícovacích bodů s průměrnou velikostí pixelu 6 cm. Výslednou kvalitu výstupů lze posuzovat pouze pomocí nezávislých kontrolních bodů, které nevstupují do výpočtu svazkového vyrovnání. Geometrická přesnost 3D modelu vypočteného pomocí SfM algoritmu je silně závislá na počtu vřícovacích bodů. Optimálním poměr vřícovacích bodů a snímků je stanoven 1 /50. Tato hodnota přibližně koresponduje s [7]. Vliv počtu VB vstupujících do SfM výpočtu předmětem analýzy v rámci tohoto článku.

Klíčovými faktory ovlivňujícími kvalitu fotogrammetrického procesu je počet a rozložení vřícovacích bodů, kvalita kamery a přesnost určení prvků vnitřní orientace, geometrie a charakter území, výška letu a velikost překrytí snímků, použitý software. Problematika smysluplného využití RPAS pro účely zaměřování prostorové polohy střech vyžaduje analýzu vlivu vybraných faktorů. Základním krokem fotogrammetrického procesu je výpočet aerotriangulace či SfM a zhodnocení její kvality. Kvalitně provedená aerotriangulace je základním předpokladem k zajištění kvality výsledných produktů.

3 METODIKA

Pro analýzu bylo využito kalibrační pole složené ze 105 uměle signalizovaných vřícovacích a kontrolních bodů. Souřadnice bodů byly terestricky zaměřeny, střední kvadratická chyba polohové složky je 0,01 m a výškové složky 0,006 m. Pro letecké snímání byl vybrán RPAS DJI Phantom4 Advanced. Snímkové sady jsou pořízeny ve třech výškových úrovních odpovídající lineární vzdálenosti pixelů na zemi (GSD) 1 cm, 2,5 cm a 5 cm. Podélný a příčný překrytí snímků je 85 %. Vzhledem ke skokové změně výšek mezi terénem a budovami dochází u menších GSD k výrazné nehomogenitě a náhlým změnám velikosti pixelu. Průměrné hodnoty jsou uvedeny v tabulce:

Tab. 1 Změny velikosti GSD na terénu a na střeše.

GSD na terénu	GSD na střeše
1	0,6
2,5	2,1
5	4,6

Faktorem ovlivňujícím kvalitu výpočtu SfM použitý fotogrammetrický software. Řada softwarů poskytuje různé pracovní postupy a způsoby implementace SfM algoritmu a multi-view stereo algoritmu (MVS) pro

výrobu mračna bodů. Pro testování byly vybrány tři často využívané fotogrammetrické programy ContextCapture od firmy Bentley, Pix4D a Agisoft. Souřadnice projekčních center z dGPS/INS byly využity jako počáteční hodnoty vstupující do výpočtu aerotriangulace. Byly zaměřeny snímkové souřadnice všech výchozích bodů. Prvky vnitřní orientace byly vypočteny v rámci svazkového vyrovnání (BBA), automaticky byly zaměřeny spojovací body. Výchozí body byly rozděleny na vřícovací body, tj. body vstupující do výpočtu aerotriangulace [8] a kontrolní body, tj. nezávislé body, nevstupující do výpočtu aerotriangulace [8]. Počet a rozmístění vřícovacích bodů bylo voleno s ohledem na jejich rovnoměrné rozložení v lokalitě. Vřícovací body jsou umístěny na terénu, kontrolní body jsou umístěny na terénu a na střeších. Na základě rozdílů mezi terestricky určenými souřadnicemi a vypočtenými souřadnicemi výchozích bodů byly vypočteny RMSE – Root mean square error.

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{\text{referenční}} - x_{\text{vypočtený}})^2} \quad (1)$$

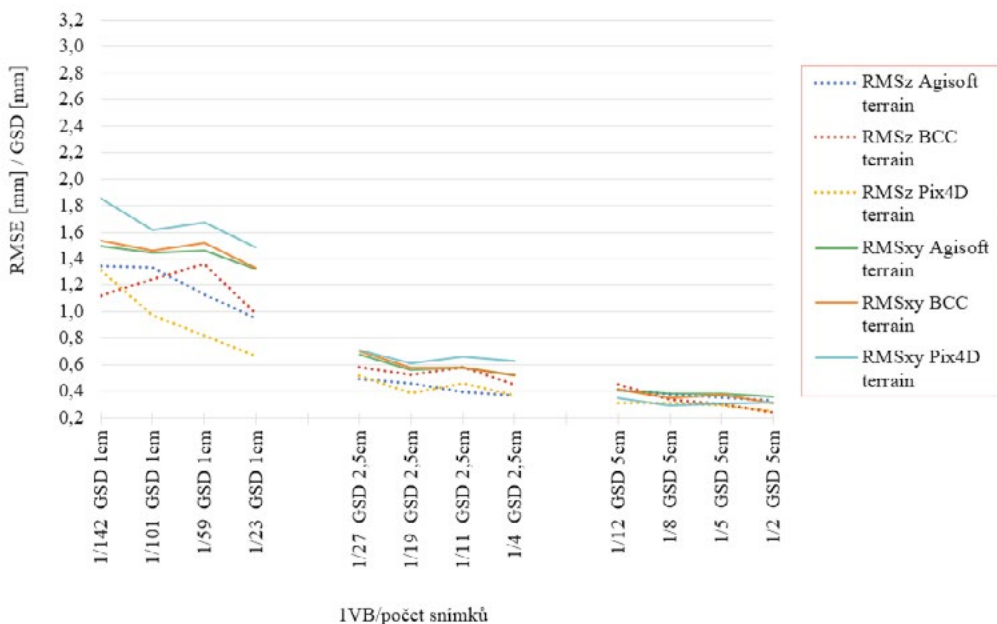
kde x je souřadnice kontrolního bodu CP

n je počet kontrolních bodů, analogicky jsou vypočteny $RMSE$ pro souřadnice Y a Z .

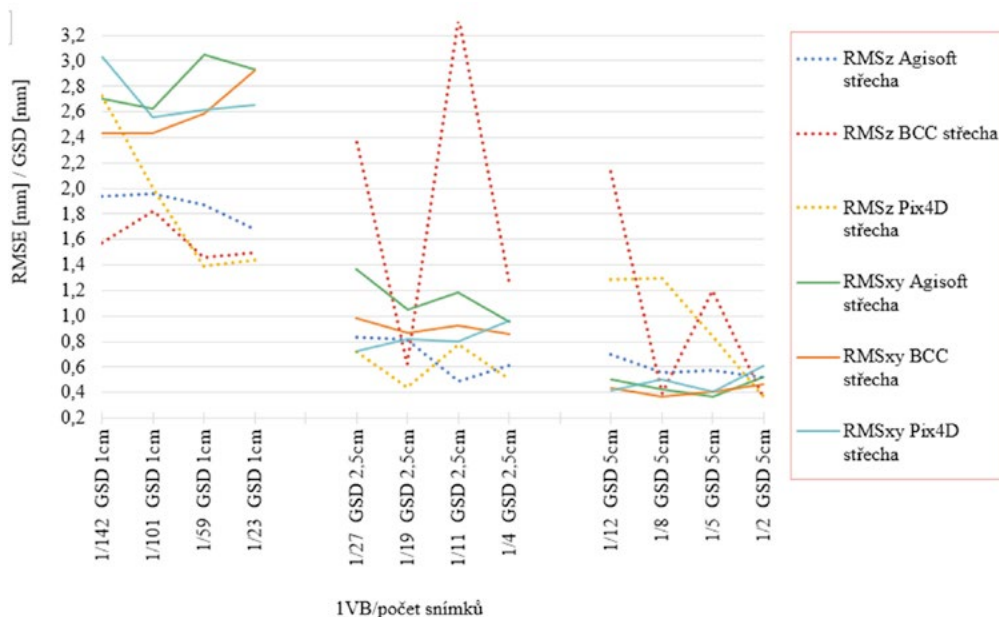
Vzorec pro výpočet střední polohové chyby $RMSE_{x,y}$:

$$RMSE_{x,y} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (2)$$

4 VÝSLEDKY



Obr. 1 Relativní přesnost na terénních kontrolních bodech v závislosti na počtu VB a počtu snímků.



Obr. 2 Relativní přesnost na střešních kontrolních bodech v závislosti na počtu VB a počtu snímků.

5 DISKUZE

TERÉNNÍ KONTROLNÍ BODY: RMSxy terénních kontrolních bodů dosahuje hodnot 13,3–18,2 mm (GSD 1 cm), 13,1 – 18 mm (GSD 2,5 cm), 14,4 – 20,9 mm (GSD 5 cm). RMSz terénních kontrolních bodů nabývá hodnot 6,6 – 13,6 mm (GSD 1 cm), 9,3 – 16,2 mm (GSD 2,5 cm), 12,4 – 22,7 mm (GSD 5 cm) v závislosti na použitém softwaru. Z Obr. 1 je zřejmý mírný vliv velikosti GSD na RMSz a RMSxy. Z Obr. 1 není zřejmý významný vliv využití různých softwarů na polohovou a výškovou složku terénních kontrolních bodů. Využití 7 VB u GSD 1 cm poskytuje optimální výsledky RMSxy. Další navýšování počtu VB neovlivní významnou měrou RMSxy. Tato hodnota odpovídá 1,5násobku velikosti GSD (Obr. 1). U GSD 2,5 cm a 5 cm je dosaženo optimálních hodnot RMS xy při využití 5 VB. Tato hodnota odpovídá 0,7násobku GSD 2,5 cm a 0,4násobku GSD 5 cm, což odpovídá subpixelové přesnosti (dále bude využíván tento termín).

Optimálních hodnot RMSz je dosaženo při využití 7VB (GSD 1 cm) a 5VB (GSD 2,5 cm a 5 cm) (Obr. 1). Tato hodnota odpovídá poměru počtu VB a snímků 1/101 (GSD 1 cm), 1/27 (GSD 2,5 cm) a 1/12 (GSD 5 cm) viz. Obr. 1. Hodnoty RMSz v tomto případě nabývají hodnot 1násobku GSD (1 cm), 0,5násobku GSD (2,5 cm) a 0,4násobku GSD (5 cm), je tedy jako u polohové složky dosaženo subpixelové přesnosti.

STŘEŠNÍ KONTROLNÍ BODY: RMSxy střešních kontrolních bodů nabývá hodnot 14,6 – 18,2 mm (GSD 1 cm), 15,2 – 28,6 mm (GSD 2,5 cm), 16,8 – 27,8 mm (GSD 5 cm) v závislosti na použitém softwaru. RMSz dosahuje hodnot 8,6 -16,4 mm (GSD 1 cm), 9,3 – 70,2 mm (GSD 2,5 cm), 18,2 – 98,1 mm (GSD 5 cm) při využití různých softwarů. Nebyl prokázán významný vliv velikosti GSD na RMSxy. Z Obr. 2 je zřejmý mírný vliv velikosti GSD na RMSz. Z Obr. 1 a Obr. 2 nebyl prokázán významný vliv využití různých softwarů na RMSxy a RMSz. Optimálních hodnot RMSxy střešních kontrolních bodů je dosaženo při využití 7VB (GSD 1 cm a 2,5 cm) a 5VB (GSD 5 cm), další navýšování počtu VB nepřineslo významné navýšení přesnosti. Toto odpovídá poměru počtu VB a snímků 1/101 (GSD 1 cm), 1/19 (GSD 2,5 cm) a 1/12 (GSD 5 cm) viz. Obr. 2. RMSxy nabývá hodnot odpovídajících 2,4násobku velikosti střešního GSD, 0,8násobku střešního GSD (2,5 cm) a 0,4násobku střešního GSD (5 cm) tj. je dosaženo subpixelové přesnosti.

RMSz nabývá optimálních hodnot při využití 5VB (GSD 1 cm). Tato hodnota odpovídá poměru 1VB/142snímků a je 1,6násobkem velikosti střešního GSD. U GSD 2,5 cm a 5 cm je zřejmá významná nestabilita výpočtů aerotriangulace tj. dochází k významným výkyvům hodnot RMSz některých výpočetních variant v závislosti na použitém softwaru (Obr. 2). V rámci dalšího testování bude ověřováno, zda lze nestabilitu eliminovat využitím vličovacích bodů umístěných na střeších objektů.

6 ZÁVĚR

Dosavadní výsledky práce prokázali poměrně malý vliv velikosti GSD/výšky letu DJI Phantom 3 Advanced na přesnost polohové a výškové složky RMSE. Min. RMSE se liší o nevýznamnou hodnotu vzhledem k přesnosti určení souřadnic vličovacích bodů. Tato skutečnost je způsobena vysokým překrytem snímků, dostatečnou strukturou povrchu, která zaručuje kvalitní výpočet prvků vnitřní orientace a také vysokým počtem vličovacích bodů v poměru k počtu snímků (zejména u GSD 2,5 cm a 5 cm).

U střešních kontrolních bodů dochází vlivem menších překrytů a vlivem homogenní textury povrchu ke zhoršení polohové přesnosti ve srovnání s terénními body. U výškové složky je dosaženo přibližně stejných hodnot jako při výpočtech RMSz terénních kontrolních bodů. Výpočty RMSz střešních kontrolních bodů pro GSD 2,5 cm a 5 cm vykazují nestabilitu.

Shodně s [4] byl prokázán jednoznačný vliv počtu vličovacích bodů na kvalitu aerotriangulace. Optimální poměr počtu VB a počtu snímků se liší v závislosti na velikosti GSD (terénní a střešní kontrolní body). Pro GSD 1 cm je to 1/101 což přibližně odpovídá závěrům v [7], pro GSD 2,5 cm je to 1/27 a pro GSD 5 cm je to 1/12.

Výsledky neprokazují vliv použitého výpočetního softwaru, ačkoliv lze pozorovat vyšší nestabilitu výpočtů při využití softwaru ContextCapture pro GSD 2,5 cm a 5 cm. Přesné výpočetní algoritmy jednotlivých softwarů však nejsou známy.

Výsledky analýzy potvrdili očekávání z hlediska dosažitelné kvality SfM a optimálního počtu VB vstupujících do výpočtu SfM ačkoliv bylo dosaženo lepších výsledků u výškové složky terénních a střešních kontrolních bodů ve srovnání s polohovou složkou. Byl prokázán jednoznačný vliv počtu VB na výslednou přesnost, naopak vliv velikosti GSD se v tomto případě výrazněji neprojevil, což je způsobeno vysokými překryty snímků, vysokým počtem spojovacích bodů (dostatečná struktura snímané oblasti), rozložením a počtem vličovacích bodů. Výsledky prokazují možnost využití RPAS fotogrammetrie pro účely zaměřování zastavěných oblastí za účelem určení prostorové polohy plochých střech při dodržení maximálních překrytů 85 % a minimálního GSD (1 cm). V dalším zkoumání bude věnována pozornost problematice vlivu velikosti překrytů v závislosti na velikosti GSD na výslednou kvalitu SfM, vlivu využití střešních vličovacích bodů a analýze fotogrammetrických produktů – husté mračno bodů, ortofoto.

Poděkování

Článek vznikl v rámci řešení projektu Specifického výzkumu VUT v Brně FAST-J-20-6174.

Použité zdroje

- [1] ČR, 2019. Návod pro obnovu katastrálního operátu a převod. Ve znění dodatku č. 1 ze dne 18. prosince 2019. In: . ČESKÝ ÚŘAD ZEMĚMĚŘICKÝ A KATASTRÁLNÍ, ročník 2019, č. j. ČÚZK-14085/2018-22.
- [2] HAMID, N a A AHMAD, 2014. Calibration of high resolution digital camera based on different photogrammetric methods. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 8th International Symposium of the Digital Earth (ISDE8), 2014(18), 6. Dostupné z : doi:10.1088/1755-1315/18/1/012030
- [3] KOCÁB, Milan, Václav ŠAFÁŘ a Jana ZAORALOVÁ, 2017. Metodika určení prostorových objektů pro komplexní pozemkové úpravy s využitím systému bezpilotních prostředků (UAS). Česká republika. 191989494 Z /B - Ověřená technologie (Ztech. Uděleno 2017. Zapsáno 2017.
- [4] MÍRJOVSKÝ, Jakub, 2013. Fotogrammetrický přístup při sběru geodeat pomocí bezpilotních leteckých zařízení. Olomouc.. Disertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra geoinformatiky.
- [5] PERÉZ, M . a F . AGUERA, 2011. Digital camera calibration Using Images Taken From An Unmanned Aerial Vehicle. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. isprsarchives, 2011(-1 -22-167-2011). Dostupné z : doi:10.1088/1755-1315/18/1/012030
- [6] SANZ ABLANEDO, E ., 2018. Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) ans SfM Photogrammetry Survey as a Function of the number and Location of Ground Control Points Used. Remote Sensing. 2018.
- [7] ŠAFÁŘ, Václav, 2017. Porovnání přesnosti a efektivity měřických metod určení objemu při povrchovém dobývání v návaznosti na novelizaci vyhlášky Českého báňského úřadu č. 435/92 Sb. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Hornicko-geologická fakulta.. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Hornicko-geologická fakulta. Vedoucí práce Staňková, Hana.

- [8] Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí. [online], 2020. online: VÚGTK [cit. 2020-11-06]. Dostupné z : <https://www.vugtk.cz/slovník/>

ACCURACY EVALUATION OF PRECISE POINT POSITIONING

Jakub Nosek^{*1}, Zuzana Richterová¹, Radovan Machotka¹

^{*}nosek.j@fce.vutbr.cz

¹Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Institute of Geodesy, Veveří 331/95, Brno

Abstract

Precise point positioning (PPP) is a well-known method of global navigation satellite systems. PPP allows for accurate positioning using only one receiver. The accuracy of PPP is strongly dependent on many other factors: the accuracy of satellite orbits and clocks, errors due to the ionosphere and troposphere, and corrections to Earth dynamics.

We processed PPP data from 212 selected International GNSS Service stations for 14 days in 2020. The results of daily PPP solutions based on float ambiguities make it possible to achieve sub-centimeter accuracy in the horizontal direction and centimeter accuracy in the vertical direction, respectively.

Key words

PPP, GNSS, accuracy, IGS

1 INTRODUCTION

Currently, Precise Point Positioning (PPP) is becoming a widely used method of Global Navigation Satellite Systems (GNSS). In the PPP approach, observations from a single receiver are used. In contrast to network double-differenced strategies, the accuracy of the PPP method is not dependent on the baseline length. For this reason, PPP provides almost the same accuracy around the world, and PPP is therefore suitable for global applications. PPP is used in many different applications such as satellite orbit determination, precision agriculture, atmospheric water vapor measurement, and earthquake monitoring [1], [2].

The accuracy of the PPP method strongly depends on the observation time, number of satellites, and the quality of the input data. Short-term observations (1 hour) allow an accuracy of 5 cm [3]. Long-term observations (daily) provide centimeter accuracy – 3D errors can be less than 1.5 cm [4].

2 LITERARY OVERVIEW

The high accuracy of the PPP method is made possible by a combination of measurement methods, correction parameters, and precise products. The precise products provided by the International GNSS Service (IGS) consist of precise satellite orbits, satellite clocks, and differential code bias (DCB). PPP users can use ultra-rapid, rapid, and final products that differ in accuracy and provision delay.

Systematic errors caused by ionospheric delay can be eliminated by dual-frequency measurement. A single frequency user needs to use ionospheric correcting products – for example, a global ionospheric map. Tropospheric effects are not frequency-dependent for GNSS signals. Therefore, the code and carrier-phase measurements are affected by the same delay at all frequencies. The tropospheric delay can be parameterized as one of the estimated parameters in the PPP approach. The zenith total delay and its corresponding mapping function are then calculated and used to correct individual satellite observations. Due to the dynamics of the Earth, the PPP results must be corrected for the solid tides, ocean tide loading, atmospheric pressure loading, and pole tides (rotation deformation due to polar motion) [5].

The general PPP functional model was developed in the 1990s [6]. This traditional approach uses ionosphere-free linear combinations to eliminate first-order ionospheric delays. Ionosphere-free combinations of dual-frequency pseudorange and carrier-phase observations equations are defined as follows:

$$P_r^s = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + c(d_r - d^s) + m_r^s Z_r + e_r^s, \quad (1)$$

$$\phi_r^s = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + c(b_r - b^s) + T_r^s + \lambda N_r^s + \varepsilon_r^s. \quad (2)$$

where ρ_r^s denotes geometric distance between satellite s and receiver r ; δt_r and δt^s are the receiver and satellite clocks offsets with respect to a system timescale; d_r and d^s are code hardware delays that can be eliminated using DCB; b_r and b^s are uncalibrated phase delays (UPD) for the receiver and satellite, respectively; Z_r is the zenith total delay and m_r^s is the corresponding mapping function; N_r^s is the ionosphere-free phase ambiguity and λ is the corresponding wavelength; and e_r^s and ε_r^s are the relevant measurement noise components, including multipath. The estimated parameters are receiver coordinates, receiver clock offset, ionosphere-free ambiguities, and zenith total delay and tropospheric mapping function, respectively. These unknown parameters can be determined using the least squares adjustment or using an Extended Kalman filter.

3 DATA AND METHODS

The accuracy evaluation presented in this study uses observational data from 212 IGS stations from January 1, 2020 to January 14, 2020. – from Day Of Year (DOY) 1 to 14. These selected IGS stations have a representative distribution over the world (Fig. 1). Exactly 2968 daily observation files, with a sampling interval of 30 s, were obtained from the Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) data center. The IGS products used in this case are final orbits, satellite clocks files, and antenna phase center offsets and variations file in ANTEX format. DCBs processed at the Center for Orbit Determination in Europe (CODE) were used.



Fig. 1 Overview of used IGS stations.

Firstly, we performed GNSS data preprocessing in G-Nut / Anubis, for example, data gaps and cycle-slips detection, satellite information (azimuth and elevation) computation, and dilution of precision (DOP) estimation. GPS-only PPP batch processing of PPP we performed using the RTKLib open-source library. In the current version, RTKLib does not support integer ambiguity resolution, and we can expect less accurate coordinates in the east direction [7].

Tab. 1 PPP processing strategy and error model.

Parameter	Models
Positioning mode	Static receiver
Observations	Code and phase observations
Frequencies	L1 + L2
Elevation mask	7°
Estimator	Extended Kalman filter
Integer ambiguity resolution	No (float)
Receiver and satellites antenna PCO + PCV	igs14.atx
Satellite orbits and clocks	Final IGS
Differential code bias	Final CODE
Tropospheric delay	Saastamoinen model and Niell mapping function
Ionospheric delay	Ionosphere-free linear combination
Phase wind-up effect	Corrected
Solid tides	IERS Convention 2010
Ocean tide loading	FES2004

Tab. 1 illustrates the computational parameters used in PPP processing. The tropospheric path delay and associated gradients were estimated along with the coordinates and receiver clock offset. Stations displacement due to ocean tide loading effect based on the FES2004 model we calculated for each station using a web-based service <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>.

For easier interpretation, we transformed International Terrestrial Reference Frame 2014 (ITRF2014) coordinates into a local topocentric system East-North-Up (E, N, U) using weekly cumulative IGS solution coordinates (significantly more accurate coordinates) as a topocentre. In this case, the topocentric coordinates represent the true errors. The accuracy of daily solutions can be characterized by standard deviations of each coordinate component as

$$s_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n E_i^2}{n}}, \quad s_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n N_i^2}{n}}, \quad s_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_i^2}{n}}, \quad (3)$$

where n is number of used IGS stations. Surfaces of constant probability density correspond to the errors for which

$$[\delta_E \delta_N \delta_U] C_x^{-1} [\delta_E \delta_N \delta_U]^T = t^2, \quad (4)$$

where C_x is 3×3 variance-covariance matrix, and t is a size parameter [8]. The confidence ellipsoid can be expressed as

$$\frac{\delta_E^2}{s_E^2} + \frac{\delta_N^2}{s_N^2} + \frac{\delta_U^2}{s_U^2} = t^2. \quad (5)$$

The size parameter of confidence ellipsoid for $1 - \alpha = 95\%$ (5% critical value) probability that the error (in this case site coordinates) lie inside the ellipsoid is $t = 2.8$, and for $1 - \alpha = 99\%$ probability is $t = 3.4$. The individual site coordinates that lie inside 95% confidence ellipsoid are accepted. The site coordinates that lie outside 95% confidence ellipsoid and inside or on 99% confidence ellipsoid are called stragglers. The site coordinates that lie outside 99% confidence ellipsoid are called outliers.

4 RESULTS

The accuracy of the daily PPP solutions was tested based on a comparison with the significantly more accurate cumulative weekly IGS solutions. Fig. 2 shows the accuracy of daily PPP solution in east, north, and up direction characterized by standard deviations. Information on the maximum absolute deviations shows Fig. 3. Fig. 4 shows that the accuracy of daily PPP solutions (horizontal deviations) is similar worldwide on January 1, 2020.

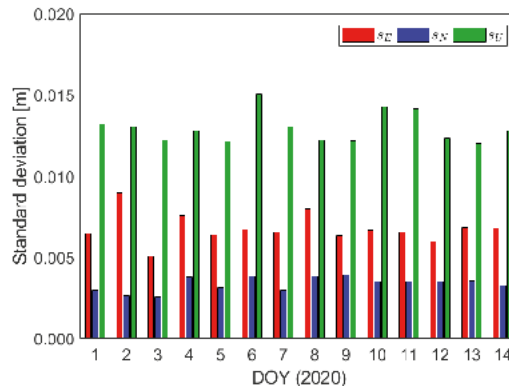


Fig. 2 Accuracy of daily PPP solutions in east, north, and up directions.

Tab. 2 Accuracy evaluation statistics based on all used stations.

Parameter	E	N	U	3D
Mean	0.0011	0.0010	0.0066	×
Maximum absolute deviation	0.0924	0.0408	0.0905	0.1000
Standard deviation	0.0068	0.0034	0.0130	0.0151

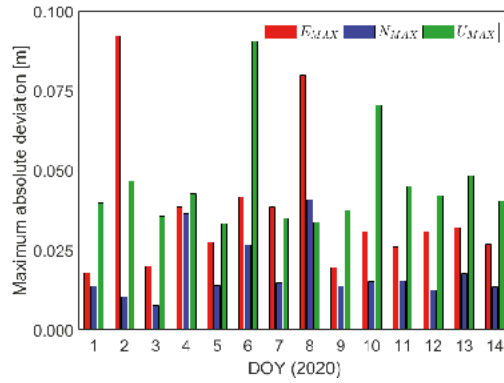


Fig. 3 Maximum absolute deviations of daily PPP solutions in east, north, and up directions.

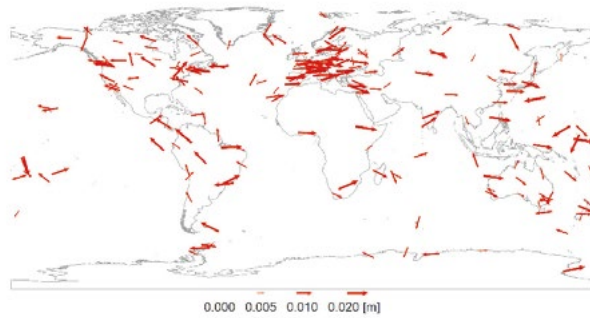


Fig. 4 Error vectors at IGS stations on January 1, 2020.

Tab. 2 gives the statistics of a daily PPP solution based on all used IGS sites. Fig. 5 shows the distribution of horizontal deviations (left) and confidence ellipsoid with 3D outliers (right), respectively.

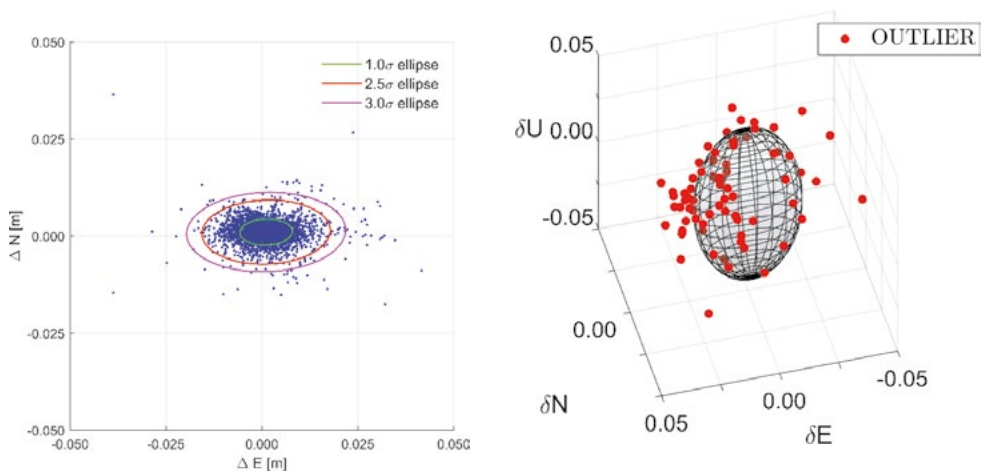


Fig. 5 Confidence ellipses (left) and confidence ellipsoid with outliers (right).

5 DISCUSSION

Based on Fig. 2 and Fig. 3, we can see that the accuracy of the PPP method is variable over the days. Accuracy differences between days may be due to variations in the ionospheric delay effect. The east coordinate component is less accurate than the north component due to the float ambiguity resolution.

The different sizes of the error vectors (Fig. 4) may be related to the variable satellite ephemeris quality. IGS sites in isolated remote areas do not provide significantly lower data quality.

Summary results in Tab. 2 show that the PPP method achieves global centimeter accuracy. A total of 73 (2.5 %) site coordinates were declared as stragglers. 77 (2.6 %) coordinates appear to be outliers.

6 CONCLUSION

We have processed 2968 observation files from 212 IGS stations using the RTKLib open-source library. The coordinates of permanent GNSS stations were processed by the PPP method using float ambiguity resolution. The daily PPP results were compared with the IGS weekly cumulative solution.

Based on the results, PPP achieves similar accuracy around the world. Daily PPP solutions can provide up to sub-centimeter accuracy in the horizontal direction and centimeter accuracy in the vertical direction, respectively. The accuracy of the east coordinate component is less than the accuracy of the north component due to the float ambiguity resolution. Testing by comparing each coordinate with a confidence ellipsoid has proven to be a useful method for detecting outliers.

Future work will focus on processing long-term GNSS data and assessing the benefits of integer ambiguity resolution.

Acknowledgement

This paper was supported by faculty research project FAST-S-19-5704 “Geometric accuracy of mobile mapping systems” of internal grant system BUT.

References

- [1] Wright TJ, Houlié N, Hildyard M, Iwabuchi T. Real-time, reliable magnitudes for large earthquakes from 1 Hz GPS precise point positioning: The 2011 Tohoku-Oki (Japan) earthquake. *Geophysical Research Letters* [Internet]. 2012Jun.28 [cited 2020Apr.12];39(12):n/a-n/a. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1029/2012GL051894>
- [2] Li X, Dick G, Ge M, Heise S, Wickert J, Bender M. Real-time GPS sensing of atmospheric water vapor: Precise point positioning with orbit, clock, and phase delay corrections. *Geophysical Research Letters* [Internet]. 2014May28 [cited 2020Apr.12];41(10):3615-3621. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/2013GL058721>.
- [3] Abou-Galala M, Rabah M, Kaloop M, Zidan ZM. Assessment of the accuracy and convergence period of Precise Point Positioning. *Alexandria Engineering Journal* [Internet]. 2018 [cited 2020Mar.28];57(3):1721-1726. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1110016817301795>
- [4] Angrisano A, Dardanelli G, Innac A, Pisciotta A, Pipitone C, Gaglione S. Performance Assessment of PPP Surveys with Open Source Software Using the GNSS GPS–GLONASS–Galileo Constellations. *Applied Sciences* [Internet]. 2020 [cited 2020Nov.30];10(16). Available from: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/16/5420>
- [5] Peter J.G. Teunissen, Montenbruck O. *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-42926-7. Available from: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>
- [6] ZUMBERGE JF, WATKINS MM, WEBB FH. Characteristics and Applications of Precise GPS Clock Solutions Every 30 Seconds. *Navigation* [Internet]. 1997 [cited 2020Mar.28];44(4):449-456. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/j.2161-4296.1997.tb02360.x>
- [7] Ge M, Gendt G, Rothacher M, Shi C, Liu J. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy* [Internet]. 2008 [cited 2020Nov.30];82(7):389-399. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s00190-007-0187-4>
- [8] Chen X, Zhang G, Hua X, Xuan W. An Average Error-Ellipsoid Model for Evaluating TLS Point-Cloud Accuracy. *The Photogrammetric Record* [Internet]. 2016 [cited 2020Nov.30];31(153):71-87.

9.

Stavební fyzika a technická zařízení budov

Building Physics, Building Services

MINIMALIZACE NEOBNOVITELNÉ PRIMÁRNÍ ENERGIE PŘI VYTÁPĚNÍ PASIVNÍHO RD

MINIMIZATION OF NON-RENEWABLE PRIMARY ENERGY IN THE HEATING OF PASSIVE HOUSES

Jan Osička^{*1}, Miloš Kalousek¹

^{*}156906@vutbr.cz/kalousek.m@fce.vutbr.cz

¹Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno-střed

Abstrakt

Díky sezónní akumulaci tepla do země za pomoci tepelných čerpadel (dále TČ) můžeme nakládat s přebytky tepla v letních měsících a následně je využít v pozdních, zimních měsících na vytápění a teplou vodu v RD. V případě využití fotovoltaiky (dále FVE) lze ještě více snížit podíl spotřeby neobnovitelné energie. Jedná se o jednu z efektivních možností využití obnovitelných zdrojů energie (dále OZE) oproti pouhému čerpaní z elektrické sítě. Díky propojení celého systému s TČ funguje země podobně jako baterie, kterou díky TČ můžeme nahřívát a energii z FVE částečně nebo zcela (u bateriového systému) využít na pohon TČ a to celoročně. Pro zkoumání maximální využitelnosti tepelné i elektrické energie bylo nutné stanovit ideální schéma celé soustavy. Následně byly porovnány náklady na vytápění různými zdroji tepla na elektřinu.

Klíčová slova

Náklady na vytápění, pasivní dům, tepelné čerpadlo, neobnovitelná energie, zemní zásobník tepla

Abstract

Thanks to the seasonal accumulation of heat in the ground with the help of heat pumps (hereinafter TČ), we can deal with excess heat in the summer months and then use them in the late, winter months for heating and hot water in the house. In the case of the use of photovoltaics (hereinafter PV), the share of non-renewable energy consumption can be further reduced. This is one of the effective possibilities of using renewable energy sources (hereinafter RES) as opposed to simply drawing from the electricity grid. Thanks to the connection of the entire system with the heat pump, the ground works similarly to a battery, which thanks to the heat pump can be heated and the energy from the PV partially or completely (in the case of a battery system) used to drive the heat pump all year round. To examine the maximum usability of heat and electricity, it was necessary to determine the ideal scheme of the entire system. Subsequently, the costs of heating with different heat sources for electricity were compared.

Key words

The cost of heating, passive house, heat pump, non-renewable energy, ground heat storage

1 ÚVOD

V poslední době je stále více diskutované téma udržitelnosti, environmentální vlivu na životní prostředí a vliv stavby jako celku na globální oteplování, kam v malém měřítku přispívají i zdroje tepla z fosilních paliv (potažmo elektrických zdrojů) díky produkovaným emisím skleníkových plynů. To je zároveň cílem Pařížské dohody z roku 2015, která chce omezit globální oteplování snížením emisí skleníkových plynů pod 2 °C [1]. Proto je nutné nahrazovat tuto neobnovitelnou energii obnovitelnými zdroji energií (dále OZE) a postupně zkoumat a vylepšovat technologie, které nám umožní tuto volně dosažitelnou energii zúročit v náš prospěch, ale i z toho důvodu, že jsou fosilní zdroje paliv vyčerpátné z krátkodobého hlediska. Pokud se pohlédneme na efektivní možnosti v našich končinách, nejlepší způsob, jak využívat OZE je slunečná a geotermální energie. Pomocí tepelných čerpadel (dále TČ) můžeme nakládat s přebytky tepla v letních měsících a následně je využít v podzimních a zimních měsících na vytápění či dohřev vody (např. pomocí sezónní akumulace do zeminy) a dále sluneční energii, kterou díky fotovoltaické elektrárně (dále FVE) může pouze pozitivně přispět na využívání obnovitelné energie.

Výzkum probíhal na pasivním dvojdomu situovaném v Moravanech u Brna. Nachází se zde 2 tepelná čerpadla, a to vzduch-voda a země-voda. TČ vzduch-voda je umístěné před domem. Zemní kolektor pro TČ země-voda se nachází v základech pasivního domu, akumulace tepla je tedy do masivní konstrukce základů, kde shora je zemní kolektor (teplný zásobník) částečně krytý objektem. Tuto možnost akumulace má v podstatě každá nová stavba. Vzhledem k proměnlivosti počasí a teplot v exteriéru je velmi složité určit, kdy je výhodné ukládání energie do země, jak s touto energií nakládat a stanovit nevhodnější scénář, kterých je nespočet. Díky propojení celého systému pomocí Wattrouteru, který hlídá přebytky energie podle přednastavených priorit je možné nastavit nevhodnější schéma celé soustavy. Na střeše domu se nachází i FVE, díky které dochází ke snížení neobnovitelné energie při využití na pohon TČ. Plánovány jsou také baterie, které by měly vyrovnat nesoulad potřeby tepla a výroby FVE.

Práce uvádí nastavení ideálního schématu, porovnání různých schémat na vytápění pasivního domu a dále jednotlivé náklady na vytápění. Dále bylo zjištěno, že díky tomuto systému lze dosáhnout až na třetinové náklady na vytápění oproti elektrickému přímotopu. Dalším cílem práce bude kombinace celého systému s dohříváním TUV, rekuperací tepla, případně možnosti simulace bateriového úložiště apod. Díky vylepšování tepelných čerpadel bude stále více zajímavější COP faktor, kdy již lze v dnešní době ukládat v letním období s COP = 9.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Vize domu bez spotřeby neobnovitelné energie se přiblížila. Experimentální rodinný dům vybavený fotovoltaikou, modifikovaným tepelným čerpadlem a sezónním tepelným akumulátorem mezi základy domu v praxi prokázal možnost snížit spotřebu neobnovitelné primární energie pod 20 kWh/m² za rok i v českých podmínkách. Výsledky testu ukázaly, že vše funguje dle předpokladu. Doc. Ing. Tomáš Matuška, Ph.D., vedoucí výzkumného týmu Energetické systémy budov v UCCEB skromně tvrdí, že vlastně nevymysleli nic nového. Že jen vhodně využili již existující přístupy a zařízení. Navržené řešení bezpochyby významně snižuje uhlíkovou stopu domu například i tím, že se zemní zásobník se v letních měsících nabíjí 100 % jen pomocí plně obnovitelné solární elektřiny bez elektrického proudu ze sítě. Regulací otáček kompresoru tepelného čerpadla, a tedy jeho výkonu, je v době, kdy je intenzita slunečního záření nižší, teplo do zemního zásobníku dodáváno ve volnějším tempu a naopak [2].

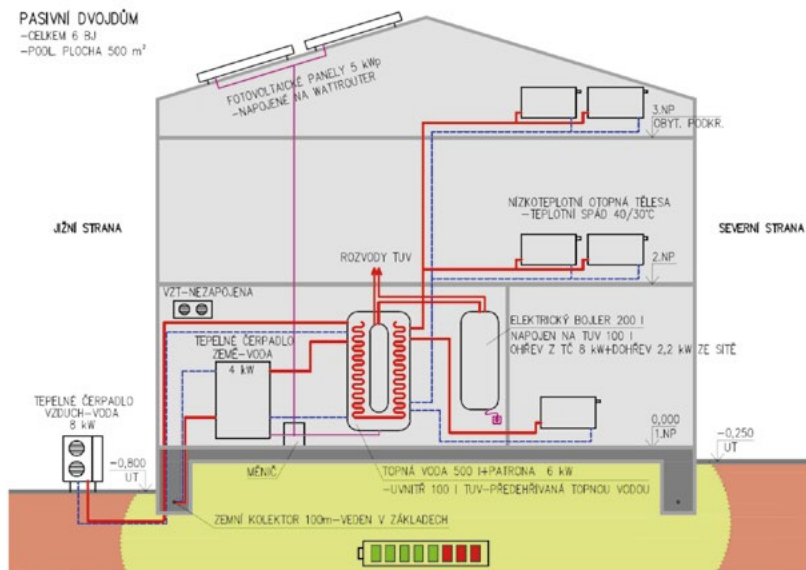
Dále technologie založené na elektřině, jako jsou elektrické kotle nebo tepelná čerpadla, se používají během hodin se záporným zbytkovým zatížením. V těchto dobách výroba elektřiny z obnovitelných zdrojů převyšuje poptávku po elektřině a přebytek se buď omezuje, nebo se používá k výrobě tepla v topných sítích. To, zda se použijí elektrické kotle nebo tepelná čerpadla, závisí nejen na aktuální situaci v elektroenergetice, ale také na dlouhodobé nákladové efektivnosti těchto technologií. Tuto nákladovou účinnost určují především parametry, jako jsou fixní náklady, účinnost a míra využití. Doba, frekvence a množství přebytků OZE ovlivňují dosažitelné hodiny plného zatížení. V našich scénářích jsou investice do tepelných čerpadel šestkrát vyšší než do elektrických kotlů. Tepelná čerpadla vyžadují k výrobě stejného množství tepla mnohem méně elektřiny než elektrické kotle, protože COP tepelných čerpadel je podstatně vyšší než účinnost elektrických kotlů. V našich scénářích předpokládáme účinnost 0,95 pro elektrické kotle a roční COP2 z modelových tepelných čerpadel je ve výsledcích kolem 3,2. V důsledku toho jsou tepelná čerpadla upřednostňována pro delší, častější a nižší přebytky OZE, zatímco elektrické kotle jsou preferovány pro kratší, vzácnější a vyšší přebytky OZE [3].

Efektivní využití přebytečné energie ze slunečního záření, které by se skladovalo v nádrži pod budovami a následně se využívalo po delší dobu, je jedním z faktorů, které významně souvisí se snižováním zátěže životního prostředí a eliminací neobnovitelných zdrojů energie, zejména fosilních paliv [4]. Jedním z možných způsobů je skladování solární energie v půdě pod budovou a v její blízkosti. Do srovnání dojde ke změně akumulovaných vlastností materiálu a optimální vzdálenosti distribučních trubek nebo prvků, aby se vytvořily nejúčinnější skladovací systémy [5].

3 METODIKA

Výzkum probíhal pasivním dvojdomu umístěným v Moravanech u Brna. V objektu jsou dvě tepelná čerpadla, a to vzduch-voda umístěný před domem a země-voda umístěný do základové desky pod dům (zemní zásobník). TČ země-voda je typu TCA 3.1 s výkonem 4 kW od firmy ATREA s průměrným COP = 2,9, druhé tepelné čerpadlo vzduch-voda je typu NeoRÉ mini s výkonem 8 kW s venkovní jednotkou od firmy Fujitsu s nadprůměrným COP faktorem. Měřicí čidla jsou umístěna na rohu na vnější straně pasu v základové spáře u vstupu do domu, potrubí je umístěno dole v základových pasech. Zemní kolektor pro TČ země-voda má délku přibližně 100 m a je napojen na nádobu pro topnou vodu o objemu 500 l, kde jsou dvě topné spirály. Uvnitř této nádoby se nachází i elektrická patrona pro dohřev s výkonem 6 kW a je také ovládána pomocí Wattrouteru. Dále se v nádobě nachází menší vnořená nádrž na TV o objemu 100 l, ve které se teplá voda stále předehřívá okolní topnou vodou. Teplotní spád

otopných těles je nízkoteplotní 40/30 °C. Pro potřebu TV slouží kombinovaný bojler o objemu 200 l, který je propojen se 100 l vnořenou nádrží a má ohřev tepelným čerpadlem vzduch-voda s výkonem 8 kW a dohřev ze sítě 2,2 kW. Pro využití sluneční energie slouží fotovoltaické panely o výkonu 5 kWp. Celý systém je propojen pomocí Wattrouteru, který hlídá přebytky vyrobené energie podle přednastavených priorit, a to v kombinaci se serverem Tellodus, který řídí další spotřebiče v souladu s přebytky a potřebou energie. Schéma soustavy naznačuje obr.1.



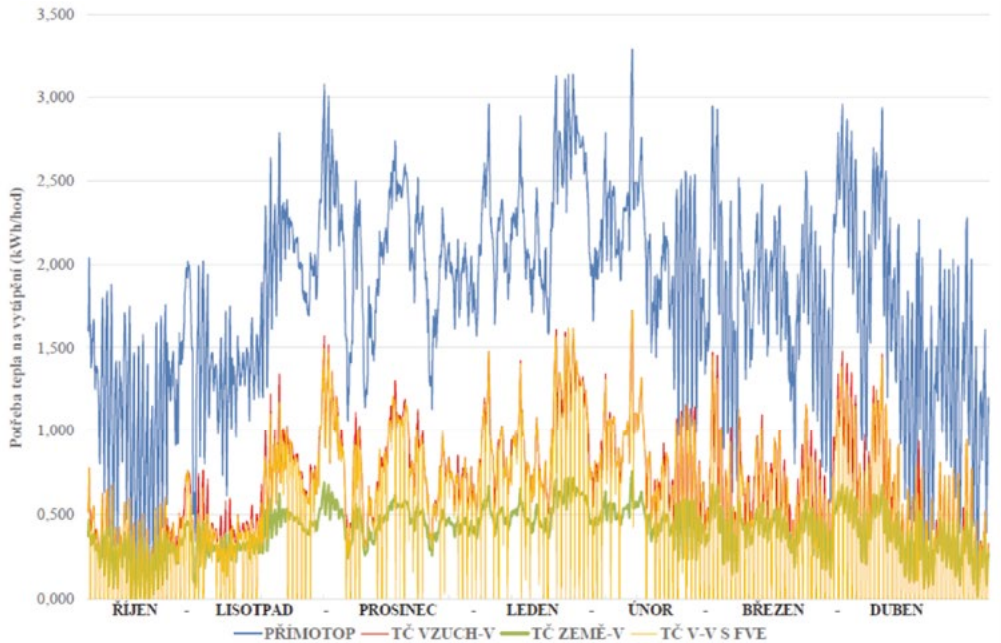
Obr. 1 Schéma soustavy zařízení domu.

Zkoumána byla topná sezóna od 1.10.2018 do 30.4.2019. Nejprve bylo nutné stanovit potřebu tepla na vytápění, porovnány byly hodnoty z elektrického přímotopného vytápění (bylo v provozu 2 roky před zavedením TČ), z TČ vzduch-voda (TČ VZDUCH-V), TČ země-voda (TČ ZEMĚ-V) a nakonec kombinace TČ vzduch-voda s fotovoltaikou (TČ VZDUCH-V S FVE). Do srovnání spotřeby neobnovitelné energie a u porovnání nákladů na vytápění byly zahrnuty rovněž režimy vytápění, jako v předchozím bodě s tím rozdílem, že bylo uvažováno TČ vzduch-voda v kombinaci s baterií. Fotografie pasivního domu je na obr. 2.

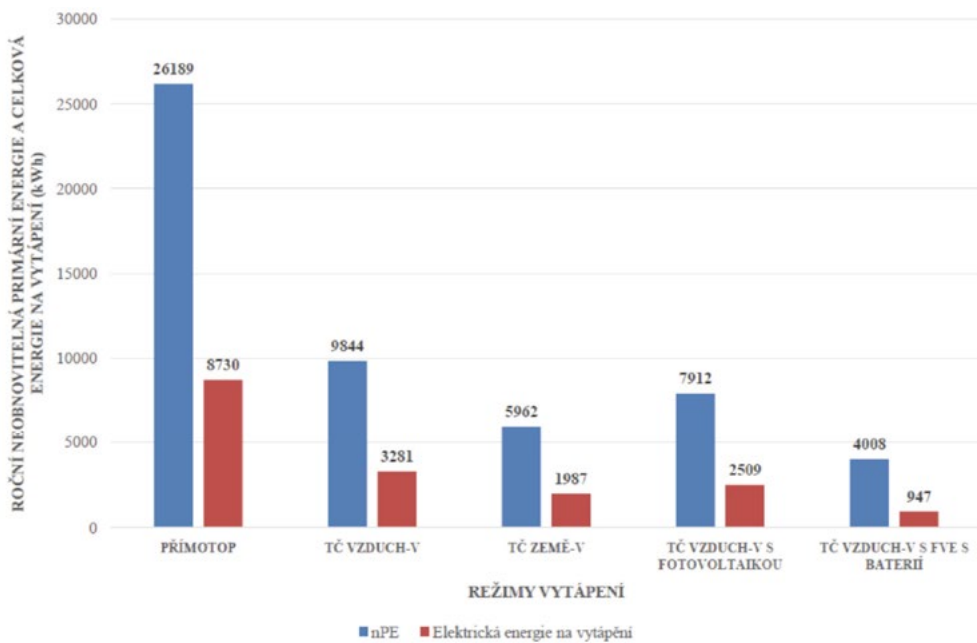


Obr. 2 Testovaný pasivní dvojdům.

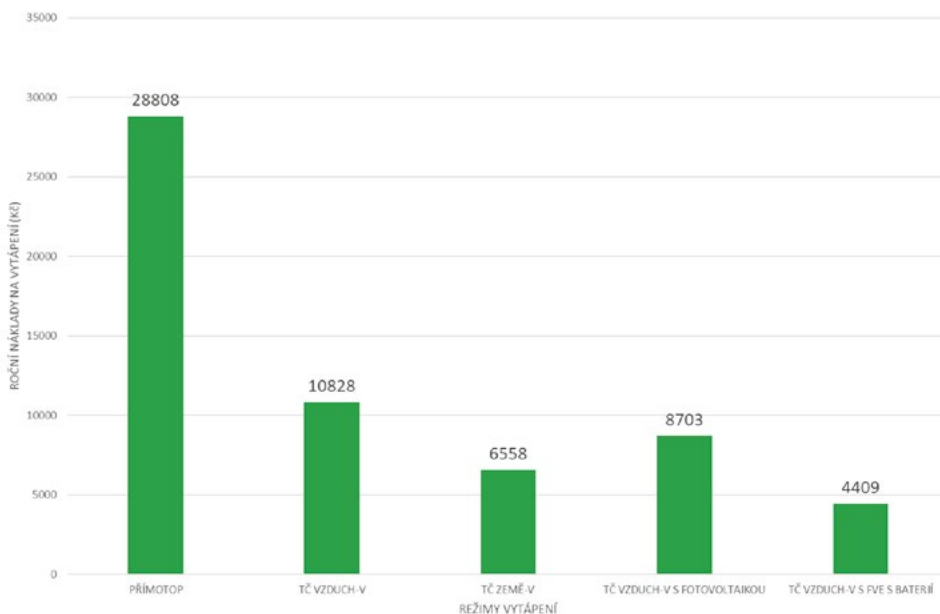
4 VÝSLEDKY



Obr. 3 Graf potřeby tepla na vytápění za topnou sezónu pro různé elektrické zdroje (včetně normové účinnosti).



Obr. 4 Roční potřeba neobnovitelné primární energie a celkové elektrické energie na vytápění.



Obr. 5 Graf nákladů na vytápění za topnou sezónu (Kč).

5 DISKUZE

Přestože v letním období se pro ukládání tepla do zemního úložiště používaly výhradně přebytky, tak na podzim a v zimě to byly také přebytky a energie získaná s co nejvyšším COP faktorem z TČ vzduch-voda, při venkovní teplotě více než 5 °C. Při nižší teplotě bylo v běhu TČ země-voda a při nedostatku el. energie z FVE byla doplněna z el. sítě. Těchto dní za topnou sezónu od 1.10.2018 do 30.4.2019 bylo 2158 z celkových 4824 měřených dnů. Při nastavení schématu ukládání nad více než 3 °C bylo těchto dnů 2826. Je tedy zřejmé, že nastavení horní hranice teploty je pro využívání energie základním kamenem. Oba příklady jsou nastavené jen pro topnou vodu (bez ohřevu teplé vody). Pokud by byl do výpočtu započten i předehřev TV, spotřeba by byla mnohem vyšší a vhodnější by byla hranice 3 °C z důvodu více teplejších dní.

Jak je zřejmé z výsledného grafu spotřeby neobnovitelné energie z topné sezóny 1.10.2018 do 30.4.2019 na obr. 3 a 4, největší spotřebu neobnovitelné energie na vytápění mají přímotopy s hodnotou 8730 kWh. Při návrhu tepelného čerpadla vzduch-voda je spotřeba cca 3x menší než vytápění přímotopy, tedy spotřeba je na hodnotě 3281 kWh. U návrhu tepelného čerpadla země-voda jsme na cca 5x menší hodnotě než u vytápění přímotopy, tedy hodnotě 1987 kWh. Při kombinaci tepelného čerpadla s fotovoltaikou je spotřeba 2509 kWh. Při použití fotovoltaiky s baterií je hodnota dokonce 947 kWh, která se zdá jako nejlepší hodnota, nicméně s ohledem na pořizovací náklady a jejím omezení při nabíjecím a vybíjecím cyklu by bylo nejlepší porovnat veškeré tyto náklady i s pořizovací cenou režimu vytápění. V RD nebyly porovnány ostatní režimy vytápění (např. plyn, biomasa apod.), nicméně by bylo vhodné i tyto režimy vytápění porovnat včetně pořizovacích nákladů. V rámci provozních nákladů by se jevíly výhodnější, ale jen při porovnání s přímotopným elektrickým vytápěním, protože ostatní způsoby na bázi TČ jsou srovnatelné nebo výhodnější.

Po násobku spotřeby neobnovitelné energie na vytápění cenou (cena 1 kWh brána 3 Kč, u FV s dotací 0,5 Kč za 1 kWh) jsou výsledky na stejném pořadí jako u roční potřeby. Tedy u elektrického přímotopu na ceně 28 808 Kč, u TČ V-V na ceně 10 828 Kč, u TČ Z-V na ceně 6 558 Kč, TČ V-V s FVE na ceně 8 703 Kč a u FVE s baterií na ceně 4 409 Kč, to vše za monitorovanou topnou sezónu od 1.10.2018 do 30.4.2019.

6 ZÁVĚR

Tato práce porovnávala různá schémata na vytápění, kde se objevila jako neefektivnější teplota pro ukládání do země 5 °C. Jak je dále zřejmé z výchozích grafů, při nastavení vhodného schématu lze snížit náklady na vytápění a současně potřebu neobnovitelné energie až o více než 6násobek s kombinací TČ vzduch-voda s fotovoltaikou a baterií oproti vytápění přímotopného. Díky TČ vzduch-voda je snížení nákladů o více než 2,5násobek, náklady na vytápění TČ země-voda se musí brát s rezervou, protože záleží na výchozí teplotě akumulace do zemního zásobníku, jestli je efektivní tento zásobník nahřívát ještě na vyšší teplotu, s ohledem na ztráty a efektivitu, v letních měsících je to určitě možné. Bylo by vhodné tuto vyšší akumulaci teploty ověřit měřením, případně simulací v programu. Veškeré náklady na vytápění by byly vhodné obohatit pořizovacími a servisními náklady zařízení včetně doby jejich návratnosti.

Funkčnost tepelných čerpadel je již dlouhou dobu zkoumána a vylepšována. Dnes jsou známy z japonských výzkumů nejlepší výsledky COP rovny 9 i v zimním období a jejich zdokonalování je stále ve vývoji. Dalším krokem tohoto výzkumu bude kombinace celého systému s předehřevem a dohříváním TUV, rekuperací tepla, možnost osazení výkonnějšího TČ (s lepším COP faktorem), případně možnosti podrobnější simulace funkce bateriového úložiště a s ohledem na pořizovací náklady a nalezení nejlepšího provozního schématu soustavy.

Poděkování

Výzkum byl financován za pomoci specifického výzkumu 2020 pod číslem **FAST-J20-6488** s názvem *Možnosti využití tepelné energie akumulované do země za pomoci tepelných čerpadel*.

Použité zdroje

- [1] United Nations Paris Agreement (2015)
- [2] HODBOŇ, Ing. Josef. Víze domu bez spotřeby neobnovitelné energie se přiblížila. *Www.tzb-info.cz* [online]. 29.8.2020 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/21087-vize-domu-bez-spotreby-neobnovitelne-energie-se-priblizila>
- [3] BERNATH, Christiane, Gerda DEAC a Frank SENSFUß. Influence of heat pumps on renewable electricity integration: Germany in a European context. *Elsevier: Energy Strategy Reviews* [online]. November 2019 [cit. 2019-11-09]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19300823#!>
- [4] PARTIKA, R.; KALOUSEK, M. Comparison of the possibility of using the accumulation underground storage under buildings. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 649, no. 649, ISSN: 1022- 6680. p. 139-142. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/272632535_Comparison_of_the_Possibility_of_Using_the_Accumulation_Underground_Storage_under_Buildings
- [5] PARTIKA, R.; KALOUSEK, M. Comparison of modeled distribution of thermal fields at seasonal ground storage segments. In *Advanced Materials Research*. Švýcarsko: Trans tech publication, 2014. ISSN: 1022-6680. p. 140-146. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/272072143_Comparison_of_Modelled_Distribution_of_The_rmal_Fields_at_Seasonal_Ground_Storage_Segments
- [6] XU, ZY a RZ WANG. Absorption seasonal thermal storage cycle with high energy storage density through multi-stage output. *Energy* [online]. Elsevier, 15 January 2019, Pages 1086-1096 [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218322783>
- [7] <http://www.meteo.jankovic.cz/zaznamy/>
- [8] Vyhláška č. 264/2020 Sb. Vyhláška o energetické náročnosti budov
- [9] Zákon č. 3/2020 Sb. Zákon, kterým se mění zákon č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií, ve znění pozdějších předpisů

VLIV PŘENOSU TEPLA MEZI POTRUBÍM TEPLÉ A STUDENÉ VODY NA MNOŽENÍ BAKTERIE LEGIONELLA

INFLUENCE OF HEAT TRANSFER BETWEEN HOT AND COLD WATER PIPES ON THE GROWTH OF THE LEGIONELLA BACTERIA

Jan Moštěk¹, Jakub Oravec¹

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veverí 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

Článek se zabývá vlivem přenosu tepla mezi potrubím teplé a studené vody na množení bakterii Legionella, která představuje značný problém v soustavách pro přípravu a rozvod teplé vody. Bakterie Legionella potřebuje pro svůj vznik velmi specifické prostředí, kde ideálním místem pro její množení jsou systémy pro přípravu a rozvod teplé vody. Podmínky pro množení Legionelly byly zkoumané pomocí numerických simulací vedení tepla na vodovodním potrubí teplé a studené vody ve výpočtovém programu CalA 4.0. Bylo vyhodnoceno několik variant odlišujících se různým geometrickým uspořádáním potrubí uloženého ve stavební konstrukci a tloušťkou tepelné izolace potrubí. Výsledky simulací potvrzují nutnost izolace potrubí vodovodu kvůli zamezení růstu Legionelly.

Klíčová slova

Legionella, numerické simulace, rozvody teplé a studené vody, vedení tepla

Abstract

The article deals with the influence of heat transfer between hot and cold water pipes on the growth of Legionella bacteria, which is a significant problem in hot water preparation and distribution systems. Legionella bacteria need a very specific environment for their formation, where systems for the preparation and distribution of hot water are the ideal place for its growth. The conditions for the growth of Legionella were investigated by numerical simulations of heat conduction in the calculation program CalA 4.0. Several variants differing in geometrical arrangement of the pipes and the thickness of the thermal insulation of the pipe were simulated. The results of the simulations confirm the need to insulate the water pipes in order to prevent the growth of legionella.

Key words

Legionella, numerical simulations, heat and cold water piping, heat conduction

1 ÚVOD

Článek prezentuje numerickou simulaci vedení tepla na potrubí vnitřního vodovodu, které je umístěno v přičce koupelny. Výzkum provádíme z důvodu možnosti špatné montáže vodovodních potrubí teplé a studené vody, které mohou zapříčinit množení bakterie Legionella. Při špatné instalaci potrubí, může docházet k zvýšenému přenosu tepla z potrubí teplé vody do potrubí studené vody a následnému ohřevu studené vody v tomto potrubí. Při ohřívání studené vody v potrubí může vzniknout ideální prostředí pro rozmnožení bakterii Legionelly, která následně může zapříčinit velké zdravotní problémy. V článku jsou provedeny numerické simulace různých variant.

2 BAKTERIE LEGIONELLA

Legionella je rod patogenních bakterií čeledi Legionellaceae. Pod pojmem Legionella dnes známe asi 60 různých bakterií, z nichž minimálně 20 je velice nebezpečných. Legionella způsobuje pontiackou horečku či závažnější nemoc legionářů [1]. Může přežít výhradně ve vodním roztoku, proto je pro člověka nebezpečná pouze pokud je vdechnuta ve formě vodní páry nebo mlhy s vysokou koncentrací bakterie [2].

Legionářská nemoc vyvolává akutní zápal plic, který může trvat i několik týdnů. Inkubační doba je přibližně 2 až 10 dnů. Mezi první příznaky patří rychlý nástup bolesti hlavy, svalů a celkový pocit malátnosti. Následuje mírný, převážně suchý kašel. Přibližně u 20 % případů začne nakažený vykašlávat krev. V nejtěžších případech onemocnění může dojít až k selhání dýchacího systému, k akutnímu selhání ledvin a případně jater. Legionářské nemoci podlehne přibližně 10 % nakažených osob. U osob s oslabeným imunitním systémem může úmrtnost dosáhnout až 70 % [3] a [4].

Bakterie rodu Legionella se vyskytují ve vodním prostředí, například rybnících, říčkách či jezerní vodě. Pro lidi jsou největším nebezpečím účelové vodní systémy, konkrétně ty, ve kterých jsou velké zásoby převážně stagnující vody. Patří mezi ně zvlhčovače, sprchy, odpařovací a chladicí systémy, okrasné fontánky a podobně. Legionella kromě vlhka potřebuje další specifické podmínky. Ideálním místem pro její množení jsou zařízení pro přípravu teplé vody [2].

V objektu nemocnice nebo zdravotnickém zařízení se bakterie nejvíce vyskytují ve vnitřním vodovodu, směšovací bateriích, sprchách, zvlhčovačích, fontánách, inhalátorech, vířivých lázních, lékařských přístrojích diagnostických či terapeutických, vrtáčkách v zubních ordinacích a dalších zařízeních, která generují aerosoly. V obytných a občanských budovách se bakterie nejvíce vyskytují v zásobníkových ohřívačích, rozvodech a armaturách teplé vody, bazénech s ohříváním vodou, málo sterilizovaných domácích inhalátorech, vyústkách vzduchu z potrubí po delší časové přestávce, centrálních klimatizačních zařízeních. V průmyslových budovách se bakterie nejvíce vyskytují v chladicích věžích, mycích linkách aut a biologických čistírnách s provzdušňováním, rozstřikovačích vod od různých brusek, skrápěných filtrech [5].

Jednou z nejzajímavějších vlastností bakterií rodu Legionella je jejich citlivost na teplotu. Ve studené vodě se takřka nerozmnožují, vhodná je pro ně teplota od 20 do 45 °C. Postupně hynou při teplotách nad 50 °C [6].

100 °C	PARNÍ ZVLHČOVÁNÍ	ELIMINACE LEGIONELLY DO NĚKOLIKA MINUT AŽ SEKUND
90 °C		
80 °C	TEPLOVODNÍ VYTÁPĚNÍ	
70 °C		
60 °C		ELIMINACE LEGIONELLY DO NĚKOLIKA HODIN
50 °C	TUV	
40 °C	LÁZNĚ CHLADICÍ VĚŽE SPRCHY	OPTIMÁLNÍ PODMÍNKY PRO MNOŽENÍ LEGIONELL
30 °C		ROZMNOŽOVÁNÍ LEGIONELL
20 °C	VODNÍ ZVLHČOVAČE CHLADIČE	
10 °C	STUDENÁ VODA	

Obr. 1 Vliv teploty na bakterii Legionella.

V málo používaných úsecích vodovodu může voda začít stagnovat. Tento úsek následně slouží jako ohnisko opětovné rekontaminace [7]. Jednou z příčin stagnace vody může být špatná funkčnost cirkulace teplé vody způsobená použitím nevhodných cirkulačních čerpadel nebo nevyvážeností cirkulačních okruhů z hlediska tlakových ztrát. Předéjit se tomu dá důsledným návrhem a dimenzováním vnitřního vodovodu teplé i studené vody. Aby nedocházelo ke dlouhodobé stagnaci, je žádoucí vodu z každé části vnitřního vodovodu rovnoměrně odebírat nebo všechny části vnitřního vodovodu propláchnout alespoň jednou za týden. Pro odbočky k uzávěrům nepoužívaných potrubí je doporučeno nepřesáhnout dvojnásobek vnitřního průměru potrubí. Nepoužívaná potrubí by měla být odstraněna [7]. Vhodnou teplotou pro množení bakterií rodu Legionella je rozmezí 20 až 45 °C, proto je třeba zajistit u vnitřního vodovodu teplé vody minimální teplotu 55 °C. Tuto teplotu by měla teplá voda dosahovat také v cirkulačním okruhu. Za 30 vteřin po úplném otevření výtokové armatury teplé vody by teplota vytékající vody neměla být nižší než 60 °C [7] (ČSN 06 0320 doporučuje teplotu teplé vody 50 až 55 °C). Vnitřní vodovod teplé vody má být navržen tak, aby se dala provést termická dezinfekce. Jedná se o dezinfekci vodou o teplotě 70 °C, která musí být docílena i u výtokových armatur v nejbližších místech vodovodu [7].

Vliv teploty na Legionella je natolik zásadní, že v roce 2012 byla vydána technická zpráva CEN/TR 16355, jež uvádí doporučení k zamezení růstu Legionella ve vnitřních vodovodech. Doporučení pro prevenci zvyšování koncentrace bakterií rodu Legionella ve vnitřních vodovodech podle TNI CEN/TR 16355 jsou:

- teplota studené vody nemá být vyšší než 25 °C,
- teplota teplé vody bez cirkulace v kterémkoli místě vodovodu by neměla klesnout pod 55 °C,
- teplota teplé vody v cirkulačním okruhu nemá klesnout pod 55 °C,
- 30 sekund po úplném otevření výtokové armatury musí vytékat voda o teplotě minimálně 60 °C, pokud národní předpis nestanoví jinak (ČSN 06 0320 doporučuje teplotu teplé vody 50 až 55 °C),
- vnitřní vodovod má být navržen tak, aby se dala provést termická dezinfekce vodou o teplotě 70 °C [8].

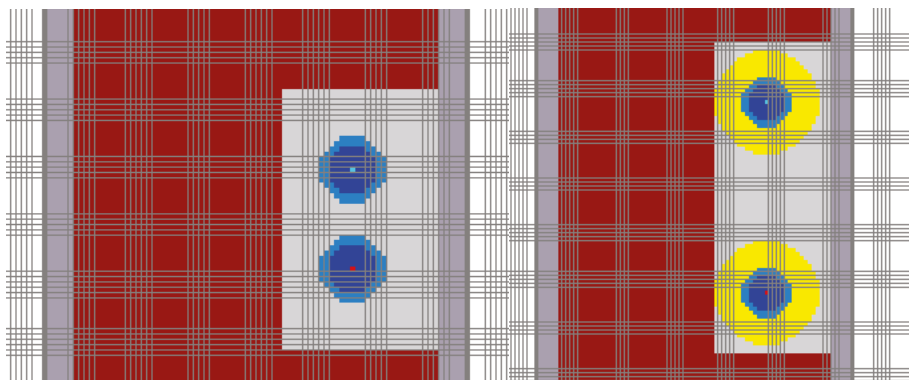
3 METODIKA

Časově neustálené numerické simulace sdílení tepla byly provedeny v programu CalA 4.0 [12]. Tento software je založen na numerickém řešení diferenciální rovnice vedení tepla. Simulace byly provedeny na připojovacím vodovodním potrubí studené a teplé vody které je uloženo umístěno v drážce keramické příčky. Drážka v příčce je vyplněna maltou a jako povrchová úprava příčky je použita omítka. V drážce je umístěno plastové potrubí PPR PN20-25x3,5.

Tab. 1 Fyzikální technické vlastnosti použitých materiálů.

Materiál	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Tepelná vodivost λ [W/(m.K)]	Tepelná kapacita c [J/(kg.K)]
Keramické zdivo	870	0,260	1000
Malta	1900	1,420	840
Voda	1000	0,600	4200
Potrubí	830	0,230	1800
Omítka	2000	0,990	790
Tepelná izolace	30	0,044	2600

Teplota v místnosti je stanovena hodnotou 24°C na obou stranách příčky, v simulaci reprezentována Newtonovou okrajovou podmínkou s hodnotou součinitele přestupu tepla 8 W/(m².K). Pro počáteční stav byla zvolena teplota teplé vody s hodnotou 55 °C a teplota studené vody v potrubí 10 °C. V numerické simulaci jsou hodnoty vyhodnoceny pro časový interval 0-300 minut v časovém kroku 5 minut. Simulace se skládá ze dvou fází. V prvních třech časových krocích je simulován nepřerušovaný odběr teplé a studené vody po dobu patnáct minut reprezentující sprchování. V simulaci je tento stav zjednodušeně reprezentován Dirichletovou okrajovou podmínkou v potrubí, která udržuje konstantní teplotu v potrubí. Po fázi odběru nastává fáze odstavky, ve které potrubím neprotéká voda a dochází k sdílení tepla mezi potrubím a jeho okolím. V tomto časovém období byl sledován nárůst teploty studené vody, která je kritická pro růst Legionelly v potrubí.

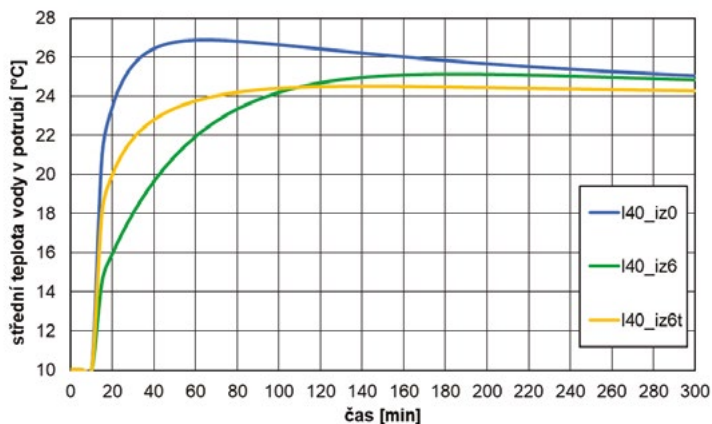


Obr. 2 Simulační model s potrubím bez izolace (vlevo) a s izolací (vpravo).

4 VÝSLEDKY SIMULACÍ

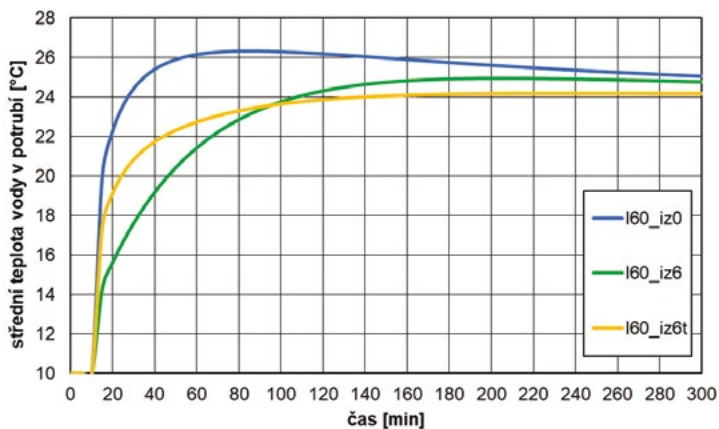
Bylo simulováno několik variant uložení potrubí v příčce. Jednotlivé varianty se liší v rozteči mezi potrubím teplé a studené vody a v tloušťce tepelné izolace potrubí. Příčka má tloušťku 150 mm, potrubí je ve všech variantách umístěno v hloubce 30 mm. Byly simulovány varianty s tepelnou izolací na obou potrubích a varianty s tepelnou izolací jen na potrubí teplé vody.

1. Varianta



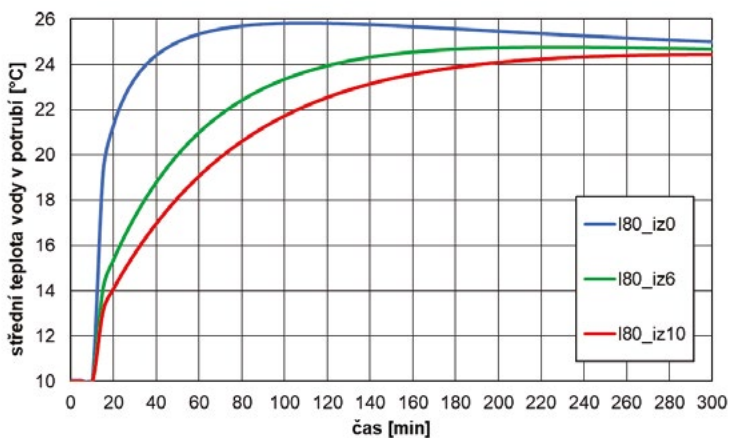
Obr. 3 Varianta 1 - průběh teploty studené vody v potrubí pro rozteč potrubí 40 mm (iz0 – bez tepelné izolace, iz6 – tloušťka tepelné izolace na potrubí SV a TV 6 mm, iz6t – tloušťka tepelné izolace 6 mm pouze na TV).

2. Varianta



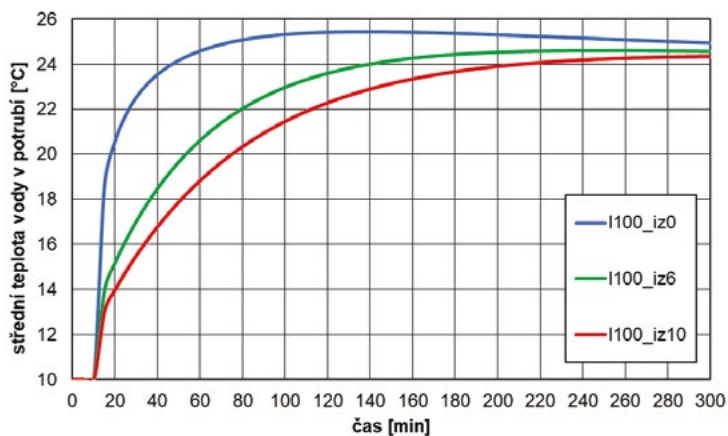
Obr. 4 Varianta 2 - průběh teploty studené vody v potrubí pro rozteč potrubí 60 mm (iz0 – bez tepelné izolace, iz6 – tloušťka tepelné izolace na potrubí SV a TV 6 mm, iz6t – tloušťka tepelné izolace 6 mm pouze na TV).

3. Varianta



Obr. 5 Varianta 3 - průběh teploty studené vody v potrubí pro rozteč potrubí 80 mm (iz0 – bez tepelné izolace, iz6 – tloušťka tepelné izolace na potrubí SV a TV 6 mm, iz10 – tloušťka tepelné izolace na potrubí SV a TV 10 mm).

4. Varianta



Obr. 6 Varianta 4 - průběh teploty studené vody v potrubí pro rozteč potrubí 100 mm (iz0 – bez tepelné izolace, iz6 – tloušťka tepelné izolace na potrubí SV a TV 6 mm, iz10 – tloušťka tepelné izolace na potrubí SV a TV 10 mm).

5 DISKUZE

Z grafických výstupů můžeme vidět, že i pokud vodovodní potrubí studené vody není izolováno teplota se v časovém intervalu 0–15 minut výrazně nemění od počáteční teploty 10 °C. Z toho můžeme vyhodnotit, že bakterie rodu Legionella nemá při odběru vody dostatečně vhodné prostředí, aby se rozmnožila do zdraví nebezpečného množství.

Z výsledků vidíme, že v časovém intervalu 15–30 minut se u všech variant potrubí bez izolace teplota studené vody v potrubí zvýší natolik, že se v ní může bakterie rodu Legionella po ukončení odběru a stagnaci vody v potrubí množit. Proto by u starších objektů, které ještě neprošly rekonstrukcí a nemají izolováno potrubí studené vody, měla provádět chemická dezinfekce nebo proplach potrubí.

Ve všech 4. variantách vidíme, že izolace potrubí velmi napomáhá k snížení přenosu tepla z potrubí teplé vody do potrubí studené vody. Dále vidíme, že širší rozestupy potrubí taktéž napomáhají k udržení nízké teploty v potrubí studené vody. Ovšem rozestupy potrubí ve variantách 3 a 4 jsou z praktického hlediska nepoužitelné, jelikož by musely provést dvě drážky ve stěnách. Ovšem při vedení potrubí v předstěnách, pod stropní konstrukcích nebo v podhledech by byly větší rozestupy vhodným řešením.

Ve variantách 1–4 u izolovaného potrubí studené i teplé vody z výsledků vidíme, že v časovém intervalu 0–30 minut nedochází k vytvoření vhodného prostředí pro rozmnožení bakterie rodu *Legionella*. Ve variantách 1 a 2 u izolovaného potrubí pouze teplé vody z výsledků vidíme, že teplota studené vody vytváří vhodného prostředí pro množení bakterie. Při kontinuální spotřebě teplé vody v časovém intervalu 0–30 minut je správnou variantou řešení izolace potrubí návlekovou izolací minimálně tloušťky 6 mm.

Při delších časových intervalech spotřeby teplé vody nebo při cirkulaci teplé vody se správné řešení provede širšími rozestupy mezi potrubím teplé, studené vody a cirkulačním potrubím a následně přidáním silnější tloušťky návlekové izolace.

6 ZÁVĚR

Po vyhodnocení naměřených výsledků byly potvrzeny očekávané předpoklady. V případech kdy dochází k častým a dlouhým pauzám mezi odběry teplé a studené vody musí být provedeno izolování potrubí návlekovou izolací, aby nebyla překročena teplota studené vody pro vznik bakterií rodu *Legionella*. Tloušťka tepelné izolace je závislá hlavně na rozestupech mezi jednotlivými trubkami, kdy se zvyšujícími se rozestupy se snižuje nutná tloušťka tepelné izolace. V případě umístění izolace pouze na potrubí teplé vody nedochází ke zvýšení maximální dosažené teploty oproti variantě s izolací na obou potrubích, ale dochází k výrazně rychlejšímu dosažení maximální teploty. Účelem této numerické simulace bylo potvrzení předpokládaných nedostatků, které mohou vznikat při montáži přípojovacích potrubí.

Poděkování

Príspevek vznikl s podporou projektu FAST-J-20-6522 Měření a analýza špičkových průtoků a spotřeb vody v budovách.

Použité zdroje

- [1] Legionářská nemoc. Vitalion [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://nemoci.vitalion.cz/legionarska-nemoc>
- [2] VAVŘÍČKA, R., J. VRÁNA a Z. POSPÍCHAL. Příprava teplé vody. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2017. ISBN 978-80-02-02713-3.
- [3] Legionella a zdraví: Legionářská nemoc. Legionella.cz [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://legionella.cz/legionella-a-zdravi/>
- [4] Legionella v pitné vodě. Měděné rozvody [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://medenerozvody.cz/aplikacni-oblasti-mednych-trubek/studena-tepla-pitna-voda/legionella-v-pitne-vode>
- [5] ŠAŠEK, J. Poznatky o Legionelle, její závažnosti a možnostech eliminace: Eliminace legionell z distribuční sítě pitné vody [online]. 2012 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://euroclean.cz/clanky/poznatky-o-legionelle-jeji-zavaznosti-a-moznostech-eliminace/#opatreni>
- [6] BÁRTA, L. Zásobování budovy vodou: Legionely [online]. Brno, 2006 [cit. 2017-05-17].
- [7] ŠAŠEK, J. Eliminace legionel z distribuční sítě pitné vody-technické aspekty [online]. 2001 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/469-eliminace-legionel-z-distribucni-site-pitne-vody-technicke-aspekty>
- [8] [online]. 2014 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/voda/pdf/tuv.pdf>
- [9] ČSN 06 0320 Tepelné soustavy v budovách – Příprava teplé vody – Navrhování a projektování.
- [10] ČSN EN 806-2 Vnitřní vodovod pro rozvod vody určené k lidské spotřebě – Část 2: Navrhování.
- [11] TNI CEN/TR 16355 Doporučení pro prevenci zvyšování koncentrace bakterií rodu *Legionella* ve vnitřních vodovodech pro rozvod vody určené k lidské spotřebě.
- [12] Šikula, O., Plášek J., Software Calculation Area (CaA) version 3.2.6 . In: . 2010. DOI: 10.13140/RG.2.2.13097.19042

COMPARISON OF PRODUCTION AND STORAGE OF COLD USING HEAT PUMP

Matej Kubica^{*1}, Daniel Kalús¹

^{*}matej.kubica@stuba.sk

¹Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Abstract

This paper shows how the production and accumulation of cold is affected when the water tank is connected to a cooling system where the source of cold is a heat pump. The paper compares different situations where there were differences in the volume of the storage tank, the volume flow of the working substance and in the direction of filling the storage tank.

The aim of the measurements was to optimize the number of start-up cycles of the heat pump by storing energy in water tanks. By reducing the number of heat pump starts, the service life of the mechanical parts of the heat pump, the compressor, is extended.

Key words

Heat pump, storage, production, cold, comparison

1 INTRODUCTION

The measurements used the knowledge from the ISO 52000-1 standard and from the standards Production - heat pumps EN 15316-4-2 (M3-8-2-) and Accumulation EN 15316-5 (M3-7). The amount of accumulated energy is assessed by method B and we confirm the principles increasing the efficiency of cooling systems, where the source of cold is a heat pump using accumulation through a water tank. Some optimization steps are not shown in the operating diagram, but are implemented via the software settings of the operating modes described in the text. The comparative measurements took place at a laboratory located near the town of Modra during the summer months. Measurements were performed on 5 operating schemes, which are described in more detail in the measurement methodolog[1], [2].

The objective of the measurements was to optimize the number of start-up cycles of the heat pump by storing energy in water tanks. By reducing the number of starts of the heat pump, the service life of the mechanical parts of the heat pump, the compressor, is extended.

2 DESCRIPTION OF THE PRESENT STATE

At present, all known cold water systems for cooling buildings are considering the accumulation of cold water. Cold water can be accumulated in tanks, pipelines or can be stored in other types of reservoirs that use the storage capacity of other working substances such as concrete structures or soil. The most commonly used variant of cold accumulation is the water tank.

For the production of cold is used in most cases, refrigeration equipment and heat pumps, which use the principle of compressor device. A compressor is a mechanical part of such a device that expires after a certain number of switching cycles and must be replaced. It is by using cold accumulation that we can protect the compressor from premature destruction [3].

3 METHODOLOGY

The methodology is divided into the following subsections:

- Methodology in terms of instruments and equipment
- Methodology in terms of time and space
- Methodology in terms of physical quantities

- Methodology in terms of pipe schemes and operating modes

Methodology in terms of instruments and equipment

The measurements were performed on devices and equipment installed in the laboratory. The following were used for the measurement:

- Heat meter - Engelmann SensoStar2 [4]
- Storage tank
 - with volume $V_1 = 100$ l and $V_2 = 300$ l
 - AKU1 tank with a volume $V_1 = 100$ l has the possibility to store cold in ascending and descending way
 - The AKU2 tank with a volume of $V_2 = 300$ l has the option of storing cold in a descending manner
- Heat pump-Mitsubishi air / water, model PUHZ-SW40VHA with a heat output of 1,7 to 4kW with software modified output to 50% of its output. The heat pump has a factory-set algorithm for changing the compressor frequency

Methodology in terms of time and space

Measurements took place during the summer months from August 2020 to the end of September 2020. The laboratory was located at an altitude of 438 m.n.m. on a forest clear with direct incident light in the Modry area. The individual operating modes of the laboratory were switched at intervals of 2 days to 2 weeks, as follows according to Tab 1.

Tab. 1 Time division of operating modes

Mode no.	Since	To
0	10. 8.	12. 8.
1	12. 8.	28. 8.
2	28. 8.	14. 9.
3	14. 9.	20. 9.
4	20. 9.	25. 9.
5	25. 9.	5. 10.

Methodology in terms of physical quantities

All quantities are recorded at 5 minute intervals. The volume flows were constant during the individual modes and were monitored via Sensostar2 heat meters with an accuracy of 6 l / h. Temperatures were measured in ° C to the nearest 0,1 ° C. The measured quantities include the following:

- Outlet temperature from the heat pump exchanger 01
- Inlet temperature from heat pump exchanger 02
- Temperature in the upper position of the storage tank AKU1
- Temperature in the lower position of the storage tank AKU1
- Temperature in the upper position of the storage tank AKU2
- Temperature in the middle position of the storage tank AKU2
- Temperature in the lower position of the AKU2 storage tank (see Fig. 1)

Methodology in terms of pipe schemes and operating modes

Experimental measurements were performed on the following 3 pipe schemes. Pipe scheme A with connection of a 100 liter storage tank with a heat pump in a top-down filling design (see Fig. 1). This is a standard connection of storage tanks as used in the latest connections.

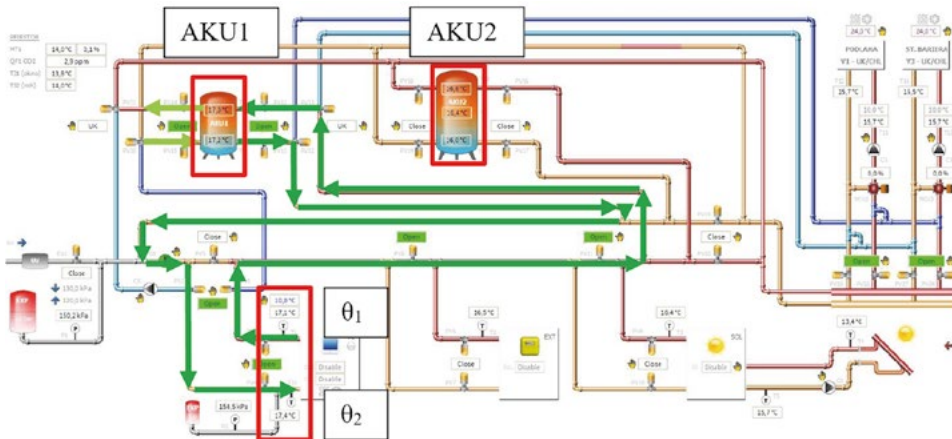


Fig. 1 Pipe scheme A with connection of a 100 liter storage tank in the filling design from top to bottom.

Pipe scheme B with connection of a 100 liter storage tank with a heat pump in a bottom-up filling design (see Fig. 2). In this connection, the gradual stratification of the prepared cold water and the elimination of mixing of hot water with cold during the start of the heat pump is considered.

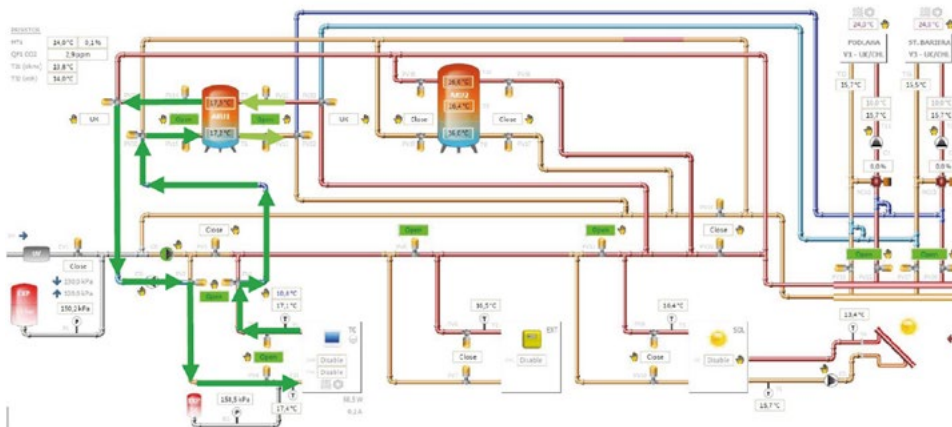


Fig. 2 Pipe scheme B with connection of a 100 liter storage tank in the bottom-up filling design.

Pipe scheme C with connection of a 300 liter storage tank with a heat pump in a top-down filling design (see Fig. 3). This is an alternative to Scheme A with a larger storage tank volume.

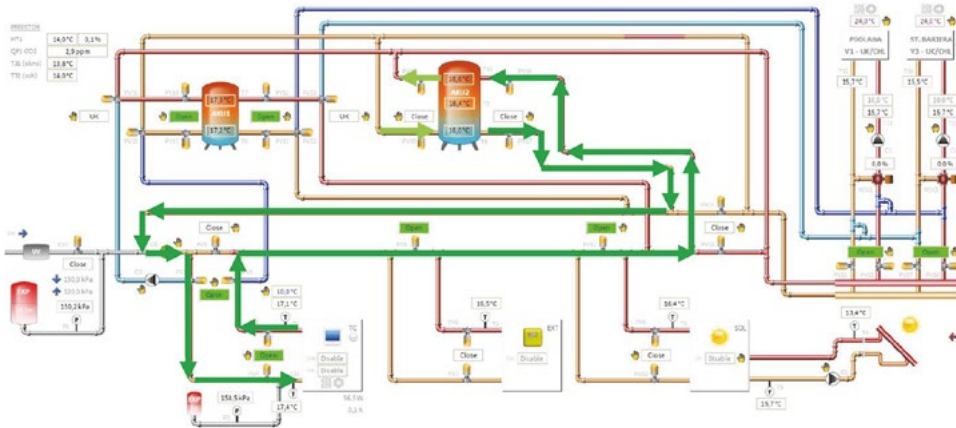


Fig. 3 Pipe scheme C with connection of a 300 liter storage tank in the filling version from top to bottom.

The differences in the operating modes of the mobile laboratory were as follows:

- How to fill the tank from top to bottom or from bottom to top.
- By adjusting the volume flow in the mode $Q1 = 745 \text{ l/h}$ and $Q2 = 915 \text{ l/h}$ in the cooling circuit that connects the heat pump and the storage tank.
- By changing the volume of the storage tank in the mode $V1 = 100 \text{ l}$ and $V2 = 300 \text{ l}$.
- Mode 0 is a connection where the system does not use a storage tank. Mode 0 uses only the volume of the pipeline and the volume of the end element for accumulation.

A detailed description of the laboratory's operating modes is shown in Tab. 2.

Tab. 2 Overview of operating modes of experimental measurements

Mode no.	Pipe Scheme	Tank Volume V (l)	Volume flow Q (l/h)	Fill direction	Note
0	A	100	745	Top to bottom	No storage
1	A	100	745	Top to bottom	
2	B	100	915	Bottom to top	
3	A	300	915	Top to bottom	
4	C	300	745	Top to bottom	
5	A	100	915	Top to bottom	

The boundary conditions for starting the heat pump were identical for each mode, with:

- The heat pump is started at 18°C at the outlet of the heat pump's heat exchanger
- The heat pump is stopped at 10°C at the outlet of the heat pump's hot water exchanger
- Accumulated energy in the form of cold was released by natural heat conduction of the storage tank

4 RESULTS

Due to the different boundary conditions of the outdoor temperature, it was possible to compare the results partially and on selected sections. The selected sections are the individual heat pump start cycles. The start of the heat pump is monitored by a temperature sensor located at the outlet of the heat pump exchanger. Fig. 4 plots and explains the temperature profile at the outlet of the heat pump exchanger during one start-up cycle.

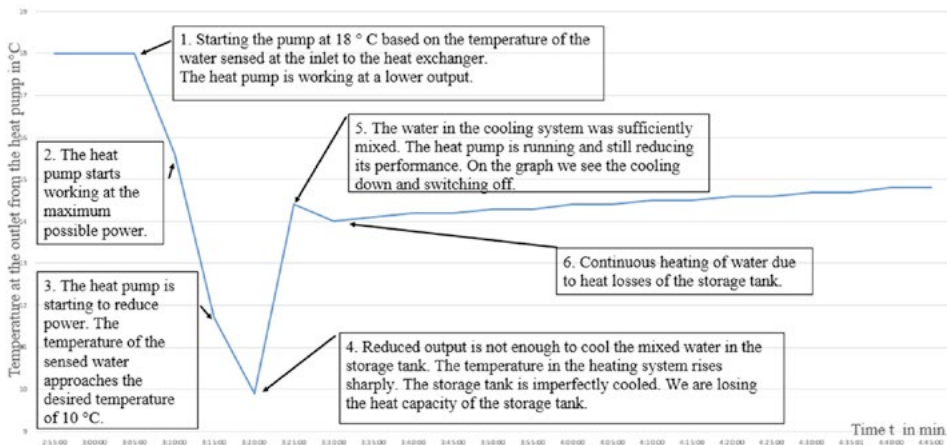


Fig. 4 Temperature profile at the heat exchanger outlet during heat pump start-up.

The comparison based on the temperature at the outlet from the heat pump of individual modes is shown in Graph No.2. Temperatures in individual modes are plotted with the median of the measured values.

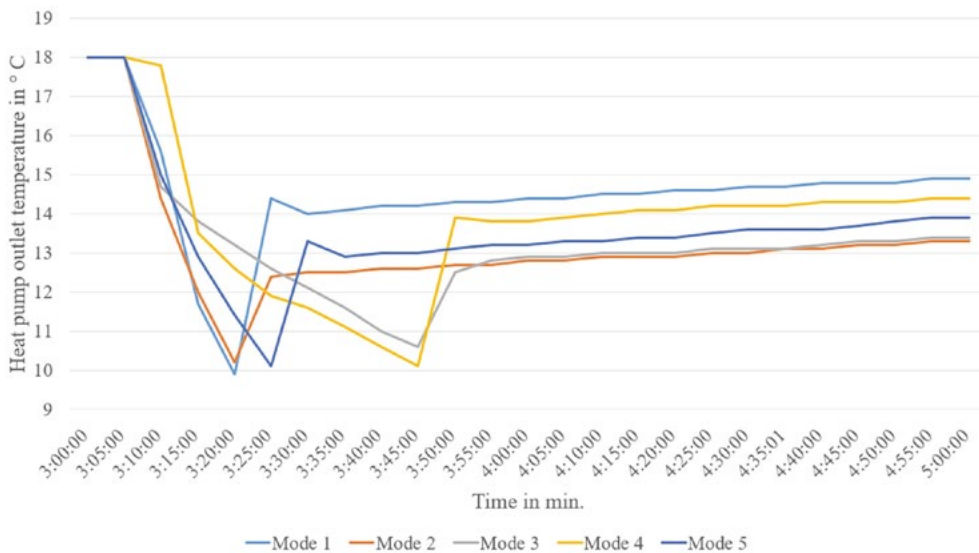


Fig. 5 Comparison of temperature course for operating modes 1 to 5.

Based on the analysis of measured values we can confirm:

- Fig. 4 shows that after switching off the heat pump, the temperature at its outlet rose sharply. The sharp increase is caused by additional dilution of hot and cold water. The heat pump was switched off prematurely by an incorrectly positioned temperature sensor. This defect occurs with each mode.
- Using a cold storage tank when comparing mode 0 and mode 1 has resulted in a reduction in the number of heat pump start cycles from 20 starts to 2 starts in 12 hours.
- When comparing mode 2 and mode 5, where the filling of the storage tank is different, it was found that filling the storage tank from top to bottom increases the capacity utilization of the water storage tank and the start time of the heat pump is shorter.
- When comparing mode 1 and mode 5 and when comparing mode 3 and mode 4, it was found that increasing the volume flow of the working fluid increases the capacity utilization of the water tank and the start time of the heat pump is shorter.

- A comparison of Mode 1 and Mode 4 confirmed that increasing the volume of the water tank reduces the number of start-up cycles over time

5 DISCUSSION

In the production of cold, the volume flow in the primary circuit between the heat pump and the storage tank AKU1 and AKU2 has a significant effect. By reducing the volume flow, in addition to the inversely proportional effect on the cooling time, it also had an effect on the correct shutdown moment of the heat pump. This paradox arises due to the poor distribution of cold by the working substance. When the production of cold by the heat pump is started, the piping at the temperature sensor, which controls the heat pump, cools down and the heat pump is switched off prematurely.

The main measure to prevent imperfect storage use will be software intervention. By software intervention through the shift of the temperature difference on the heat sensor controlling the operation of the heat pump, we would achieve the maximum proposed capacity of the storage tank. The temperature difference would be set based on a retrospective analysis of the temperature profile in the trend of the temperature sensor that controls the heat pump. The software solution will not increase the investment costs of the connection in any way. The comparison based on the temperature at the outlet from the heat pump of individual modes is shown in Fig. 5. Temperatures in individual modes are plotted with the median of the measured values.

6 CONCLUSION

The measurements proved the principles that are applied in the accumulation of heat or cold. We can influence the accumulation efficiency and the reduction of the number of start-up cycles of the heat pump by changing the volume flow of the working substance, changing the volume of the water tank, sweeping the water tank but also the correct placement of the temperature sensor.

By reducing the volume flow, in addition to the inversely proportional effect on the cooling time, it also had an effect on the correct shutdown moment of the heat pump. This paradox arises due to the poor distribution of cold by the working substance. When the production of cold by the heat pump is started, the piping at the temperature sensor, which controls the heat pump, cools down and the heat pump is switched off prematurely.

Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Education, Science, Research and Sports of the Slovak Republic through the Young Researcher 2020 grant and KEGA 044STU-4/2018.

References

- [1] STN EN ISO 52000-1. 2019. Energy performance of buildings. Overarching EPB assessment. Part 1: General framework and procedures. Slovensko: SUTN.
- [2] STN EN 15316-4-2. 2017. Energy performance of buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 4-2: Space heating generation systems, heat pump systems, Module M3-8-2, M8-8-2. Slovensko: SUTN.
- [3] OLESEN, B.W., DE CHARLI, M., SCARPA, M. U.A.: Dynamic Evaluation of the Cooling Capacity of Therma-Active Building Systems. In: ASHRAE Winter Meeting. Chicago (IL, USA), 21. – 25. Jan. 2006. Vol. 112, Pt. 1, S. 350-357.
- [4] https://www.regincontrols.com/Root/Documentations/56_104658/MSH_inst_en.pdf

PODÍL ROČNÍ DODANÉ ENERGIE NA VYTÁPĚNÍ PRO DOPLŇKOVÝ ELEKTRICKÝ PŘEDEHŘEV VZDUCHOTECHNICKÝCH JEDNOTEK

PART-YEAR SUPPLIED ENERGY FOR SUPPLEMENT ELECTRIC PREHEATING OF AIR CONDITIONING UNITS

Dominik Cakl^{*,1}, Petr Kotek²

*cakl.d@vutbr.cz

¹ Fakulta Stavební VUT v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno-střed

² EnergySim Praha, Čs. armády 785/22, 160 00 Praha 6 – Bubeneč

Abstrakt

Článek vznikl z důvodu častých dotazů, zda v průkazu energetické náročnosti budovy, do kterého vstupují různé energonositele, uvažovat elektrickou energii na vytápění pro doplňkový elektrický přehřev, který funguje jako protimrazová ochrana rekuperačních, entalpických a regeneračních výměníků ve vzduchotechnických jednotkách. Cílem tohoto článku je výpočet koeficientu pokrytí roční potřeby tepla pro doplňkový elektrický přehřev vzduchotechnických jednotek v závislosti na době provozu a výkonu.

Klíčová slova

Elektrický přehřev, energetická náročnost budov, PENB, primární neobnovitelná energie, budovy s téměř nulovou spotřebou energie

Abstract

The article was created due to frequently asked questions whether in the energy performance certificate of the buildings with different energy carriers, it considers electricity for heating for additional electric preheating, which acts as a frost protection of recuperation, enthalpy and regeneration exchangers in air handling units. The aim of this article is to calculate the coefficient of coverage of annual heat needs for additional electrical preheating of air handling units depending on the time of operation and output.

Key words

Electric preheating, energy performance of the buildings, EPBD, primary non - renewable energy, nearly zero-energy buildings (NZEB)

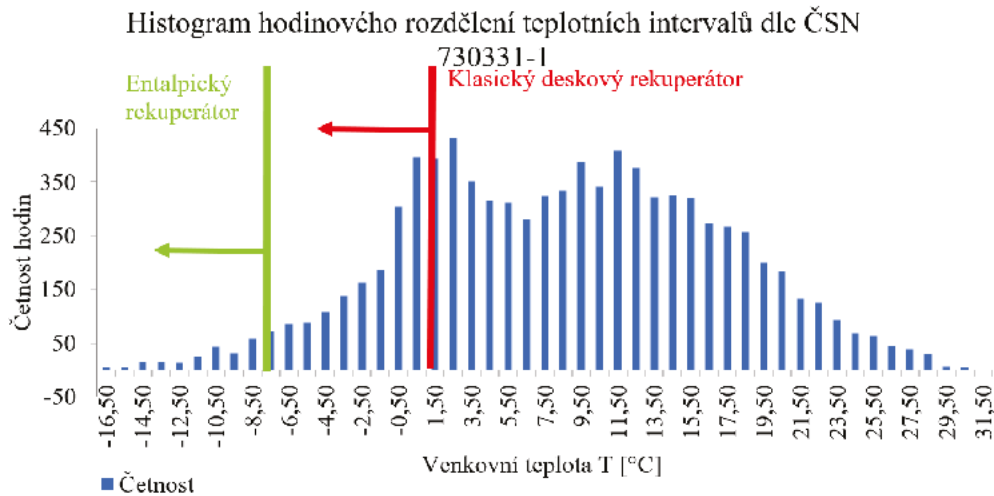
1 ÚVOD

Závazná norma ČSN 7303031-1 neuvádí koeficient pokrytí roční potřeby tepla pro doplňkový elektrický přehřev vzduchotechnických jednotek, přičemž norma obsahuje přehlednou tabulku, kde je uveden koeficient pokrytí roční potřeby tepla příslušným zdrojem v případě použití více zdrojů na vytápění, například koeficient roční potřeby tepla na vytápění pro tepelné čerpadlo v bivalentním režimu. Cílem tohoto článku je výpočet koeficientu pokrytí roční potřeby tepla pro doplňkový elektrický přehřev vzduchotechnických jednotek v závislosti na době provozu a výkonu.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Protimrazová ochrana by měla být v PENBu správně zadána. "Protimrazovka" spíná u klasického výměníku při venkovní teplotě cca +1 °C a nižší. U entalpických pak spíná při venkovní teplotě cca -8 °C a nižší. Viz histogram níže, kde je vidět i počet hodin v roce, kdy je sepnutá. Tedy více jak 5 % času v roce. To že to nikdo nezadá je věc druhá a ten kdo "protimrazovku" zadá, si pohorší v PENBu primární neobnovitelnou energií.

Důsledkem může být, že jednomu energetickému specialistovi PENB pro novostavbu bude splňovat podmínky pro výstavbu dle vyhl. č. 264/2020 a druhému ne [2] [5].



Obr. 1 Histogram hodinového rozdělení teplotních intervalů dle ČSN, doplněný o počet hodin se zapnutou protimrazovou ochranou dle typu deskového výměníku. Zdroj: spol. Energysim s.r.o., [1].

Tab. 1 Podíl roční dodané energie na vytápění pro příslušný doplňkový zdroj tepla dle ČSN 730331-1 [1].

Doplňkový zdroj tepla	$f_{H,SYS}$ (-)
Krby a krbové vložky s uzavřeným topeništěm	0,25
Doplňkový elektrodohřev pro bivalentní tepelné čerpadlo vzduch / voda	0,1
Doplňkový elektrodohřev pro bivalentní tepelné čerpadlo voda (země) / voda	0,05
Ostatní zdroje tepla	v závislosti na době provozu a výkonu doplňkového zdroje tepla vůči hlavnímu zdroji tepla

3 METODIKA

Klimatická data

Pro hodinové rozdělení teplotních intervalů byla zvolena tabulka v závazné ČSN 730331-1, která obsahuje informativní parametry pro výpočet energetické náročnosti budov za účelem jejich hodnocení. Konkrétně tabulku "Rozdělení teplotních intervalů", lze použít v případě některých bilančních výpočtů a obsahuje hodinové rozdělení teplotních intervalů v průběhu roku.

Histogram hodinového rozdělení teplotních intervalů dle ČSN je uveden výše.

Výpočtový model

Na základě platných hygienických předpisů s přihlédnutím na předpokládaný způsob využívání rodinného domu v určitém stupni komfortu byl stanoven průtok čerstvého vzduchu na 200 m³/hod. Typickým parametrem nuceného větrání je účinnost zpětného získávání tepla, která je pro objemový průtok vzduchu do 600 m³/h a křížový deskový výměník udávána 80 % (celoroční účinnost zpětného získávání tepla) [1]. Venkovní teplota

vzduchu, pro kterou se spíná přehřev, byla dle informací od výrobce uvedena pro klasický deskový výměník 1,5 °C a pro entalpický výměník -7,5 °C. Teplota interiéru byla zvolena 20°C. Fyzikální vlastnosti vzduchu byly uvažované neměnné. Potřeba tepla pro přehřev byla vypočtena dle vztahu:

$$Q_{\text{pro el. přehřev}} = V * \frac{q}{3600} * c * (\theta_e - \theta_p) * h \quad (1)$$

$$Q_{\text{pro dohřev}} = V * \frac{q}{3600} * c * (\theta_e - \theta_i) * (1 - \eta) * h \quad (2)$$

kde Q je dodaná energie (kWh), V je průtok vzduchu, q, c fyzikální vlastnosti vzduchu (hustota a tepelná kapacita), θ_e je teplota vzduchu v exteriéru, θ_i je teplota vzduchu v interiéru, θ_p je pro přehřev teplota spínání el. přehřevu, nebo teplota před výměníkem pro dohřev, η účinnost zpětného získávání tepla (0,80), h počet hodin v roce v jednotlivém teplotním intervalu.

Podíl roční dodané energie na vytápění pro doplňkový el. přehřev VZT:

Podíl roční dodané energie na pokrytí tepelné ztráty větráním pro doplňkový el. přehřev VZT ku podílu tepelných ztrát větráním.

4 VÝSLEDKY

V této části příspěvku jsou prezentovány výsledky spotřeby tepla na větrání. Dále jsou uvedeny podíly roční dodané energie na vytápění pro doplňkový elektrický přehřev vzduchotechnických jednotek pro dvě různé teploty spínání elektrického přehřevu.

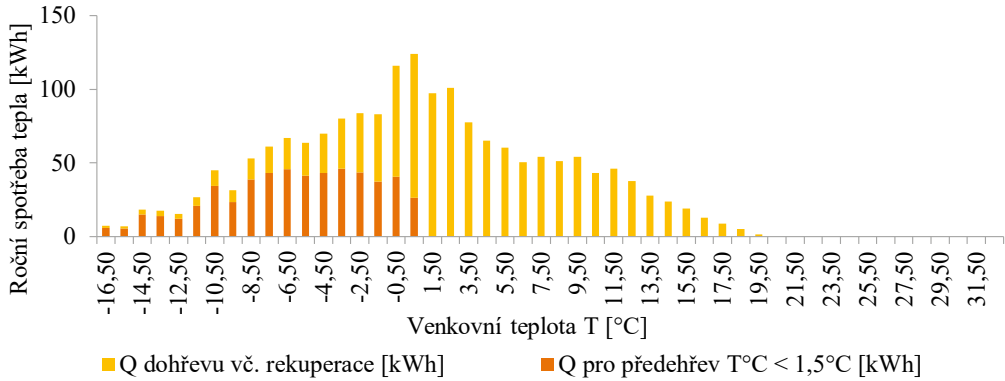
Tab. 2 Přehled dodávky tepla, spínání přehřevu při T°C < 1,5°C.

	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec	Suma
Q pro přehřev T°C < 1,5°C [kWh]	119	234	14	6	0	0	0	0	0	2	20	143	538
Q dohřevu bez rekuperace	876	805	755	553	370	248	138	159	332	522	701	887	6346
Q dohřevu vč. rekuperace [kWh]	175	161	151	111	74	50	28	32	66	104	140	177	1269
Celkem [kWh]:													1807
Podíl měsíční dodávky tepla elektro přehřevem	41%	59%	9%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	12%	45%	
Podíl roční dodané energie na vytápění pro doplňkový el. přehřev VZT, spínání při T°C < 1,5°C													30%

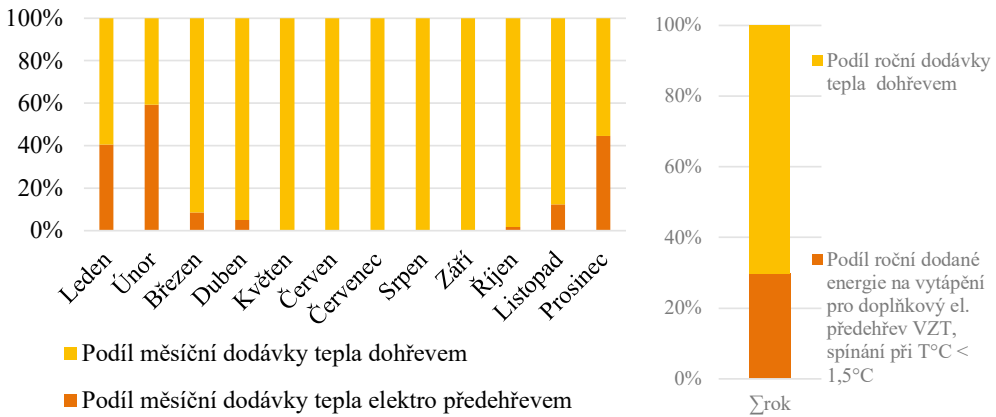
Tab. 3 Přehled dodávky tepla, spínání přehřevu při T°C < -7,5°C.

	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Listopad	Prosinec	Suma
Q pro přehřev T°C < -7,5°C [kWh]	3	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	45
Q dohřevu vč. rekuperace [kWh]	248	252	192	140	93	62	34	40	83	131	180	254	1710
Celkem [kWh]:													1755
Podíl měsíční dodávky tepla elektro přehřevem	1%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	
Podíl roční dodané energie na vytápění pro doplňkový el. přehřev VZT, spínání při T°C < -7,5°C													3%

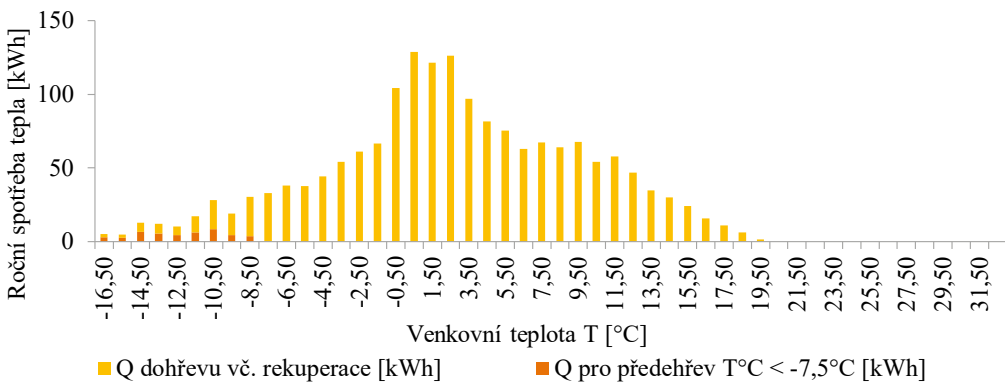
Níže jsou uvedeny grafy, které poukazují na podíl roční dodané energie na vytápění pro doplňkový el. přehřev vzduchotechnických jednotek.



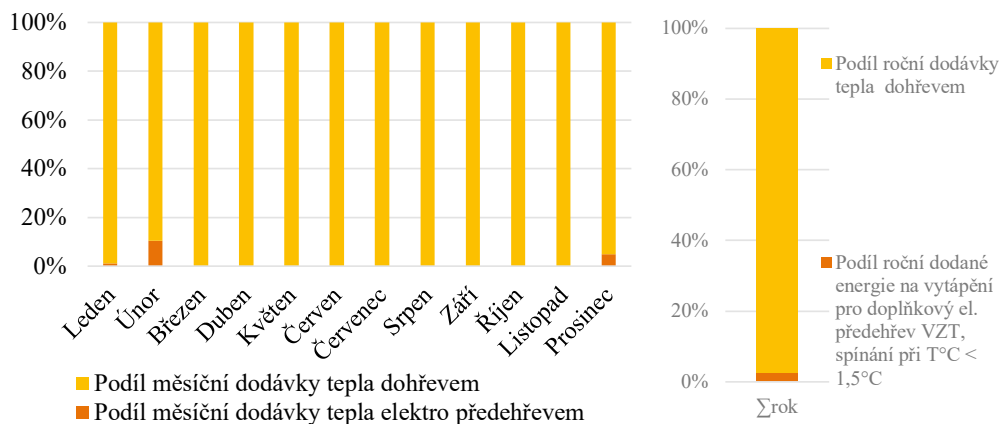
Obr. 2 Histogram dodané energie na ohřev vzduchu v závislosti na četnosti venkovní teploty pro pokrytí spotřeby tepla na větrání.



Obr. 3 Histogram podílu měsíční a roční dodávky energie elektrickým předehřevem a dohřevem pro pokrytí spotřeby tepla na větrání. Každý měsíc představuje 100 % pokrytí měsíční spotřeby tepla na větrání.



Obr. 4 Histogram dodané energie na ohřev vzduchu v závislosti na četnosti venkovní teploty pro pokrytí spotřeby tepla na větrání.



Obr. 5 Histogram podílu měsíční a roční dodávky energie elektrickým přehřevem a dohřevem pro pokrytí spotřeby tepla na větrání. Každý měsíc představuje 100 % pokrytí měsíční spotřeby tepla na větrání.

5 DISKUZE

V Tab. 2 a Tab. 3 bylo provedeno vyhodnocení podílů roční dodané energie na vytápění pro doplňkový elektrický přehřev vzduchotechnických jednotek pro dvě různé teploty spínání elektrického přehřevu. Při porovnání výsledků můžeme tvrdit, že elektrický přehřev spínající při vyšších teplotách může hrát důležitou roli při hodnocení energetické náročnosti budov z pohledu hodnocení primární energie z neobnovitelných zdrojů obzvláště u budov, jejichž tepelná ztráta větráním se přibližuje tepelné ztrátě obálkou anebo ji ve specifických prozovech převyšuje.

Protimrazová ochrana, která se spíná při extrémně nízkých teplotách nemá při hodnocení energetické náročnosti budovy velký dopad na hodnocení primární energie z neobnovitelných zdrojů a z tohoto důvodu by se dalo uvažovat zadání příkon el. přehřevu do ostatních pomocných zařízení, která jsou integrální součástí VZT jednotky.

Příklad rodinného domu:

Dále je uveden příklad rodinného domu a jeho vliv roční dodané energie na vytápění pro doplňkový el. přehřev VZT. Tento podíl vychází na pouhých 2,3 % z bilance celkových energetických ztrát objektu. Koefficient pokrytí roční potřeby tepla pro doplňkový elektrický přehřev vzduchotechnické jednotky je v tomto případě 0,023. [3]



Obr. 6 Bilance ztrát energie typického nízkoenergetického domu se vzduchotechnikou (%) [3] [4].

Tab. 4 Sledované parametry typického nízkoenergetického domu.

Sledované parametry typického nízkoenergetického domu. Vlevo není v PENBu uvažován el. přehřev, vpravo ano.		
Podlahová plocha objektu z vnějších rozměrů [m ²]	95	95
Měrná potřeba tepla na vytápění pro energeticky vztažnou plochu [kWh/m ² za rok]	44,7	44,7
Násobnost výměny vzduchu [1/h]	0,3	0,3
Výměna vzduchu [m ³ /hod]	100	100
Účinnost rekuperace	80%	80%
Podíl roční dodané energie na pokrytí tepelné ztráty větráním pro doplňkový el. přehřev VZT, spínání při	-	30%
Podíl tepelných ztrát větráním	-	7,8%
Podíl roční dodané energie na vytápění pro doplňkový el. přehřev VZT, spínání při T°C < 1,5°C	-	2,3%
Primární energie z neobnovitelných zdrojů pro 2 osoby [kWh/m ² za rok]	129	131
Hodnocení splnění požadavku, které je vyžadováno u nové budovy [kWh/m ² za rok]	137	137

6 ZÁVĚR

Cílem tohoto článku byl výpočet koeficientu pokrytí roční potřeby tepla pro doplňkový elektrický přehřev vzduchotechnických jednotek v závislosti na době provozu a výkonu. Je uveden alespoň jeden příklad koeficientu pro hodnocení splnění požadavku pro výstavbu typického nízkoenergetického domu, který vychází 0,023.

Tab. 5 Podíl roční dodané energie na vytápění pro doplňkový elektrický přehřev VZT pro nízkoenergetický rodinný dům.

Doplňkový zdroj tepla	f _{LSYS} (-)
Doplňkový elektrický přehřev VZT pro nízkoenergetické rodinné domy. Spínání při T°C < 1,5°C	0,023

Elektrický přehřev spínající při vyšších teplotách může hrát důležitou roli při hodnocení energetické náročnosti budov z pohledu hodnocení primární energie z neobnovitelných zdrojů obzvláště u budov, jejichž tepelná ztráta větráním se přibližuje tepelné ztrátě obálkou anebo ji ve specifických provozech převyšuje.

Dalšími kroky výzkumu by měly být výpočty koeficientů pokrytí roční potřeby tepla pro doplňkový elektrický přehřev vzduchotechnických jednotek pasivních domů, čistých prostor a dalších provozů, kde tepelná ztráta větráním se přibližuje tepelné ztrátě obálkou anebo ji ve specifických provozech převyšuje. Dále by měl být vypočtený průměrný koeficient alespoň ze tří vzorků.

Dále by byl vhodný rozsáhlejší průzkum "chytrosti" montovaných el. přehřevů VZT jednotek. Pokud "protimrazovka" nemá plynou regulaci el. výkonu a v režimu ON/OFF sepne vždy na plný výkon, změní se negativně podíl neobnovitelné primární energie v hodnoceném objektu v rámci celkového hodnocení PENB.

Poděkování

Děkuji společnosti EnergySim za poskytnutá data a konzultaci.

Použité zdroje

- [1] ČSN 73 0331-1 Energetická náročnost budov - Typické hodnoty pro výpočet - Část 1: Obecná část a měsíční výpočtová data 2020
- [2] Vyhláška č. 264/2020 Sb. Vyhláška o energetické náročnosti budov
- [3] Výpočetní program ENERGETIKA od společnosti DEKPROJEKT s.r.o.
- [4] ČSN EN ISO 13789 - Tepelné chování budov - Měrné tepelné toky prostupem tepla a větráním - Výpočtová metoda
- [5] Návod k obsluze k přehřevu EP 125, EP 150. Dostupné z: http://www.dompot.cz/0_pokus/predehr_1.pdf

ZABEZPEČENIE POŽADOVANEJ TEPLoty STUDENEJ PITNEJ VODY VO VODOVODE V BUDOVE

ENSURING THE REQUIRED POTABLE WATER COLD TEMPERATURE IN WATER SUPPLY SYSTEM INSIDE BUILDINGS

Dominika Macková^{*1}, Jana Peráčková

^{*}dominika.mackova@stuba.sk

¹Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra Technických zariadení budov, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Abstrakt

Príspevok sa venuje požiadavkám na hygienu studenej pitnej vody vo vodovodoch vnútri budov. Definuje, aká teplota by mala byť zabezpečená vo vodovode v budove podľa rôznych predpisov a noriem a definuje aké sú minimálne požiadavky na výmenu vody v potrubí. Príspevok popisuje dôležitosť dostatočnej výmeny vody v potrubí, popisuje hlavné faktory ovplyvňujúce teplotu pitnej vody a uvádza základné technické opatrenia a možné riešenia problematiky zabezpečenia požadovanej hygieny pitnej vody vo vnútornom vodovode.

Kľúčové slová

Pitná voda, studená voda, stagnácia vody, výmena vody v potrubí, cirkulácia, hygiena pitnej vody

Abstract

The paper deals with the requirements of the quality of potable water cold in water piping system inside buildings. The contribution focuses on temperatures, which should be provided in the water piping system and describes the main risks and factors influencing the temperature of cold water. The paper shows the basic measures and possible solutions of the problem of ensuring the sufficient potable water exchange in buildings. In buildings, there usually are not ideal conditions for ensuring the hygiene of potable water, the resulting hygienic risks can be reduced using the right technical solution.

Key words

Potable water, cold water, water stagnation, water exchange, water circulation, hygiene of potable water

1 ÚVOD

K základným požiadavkám kvality pitnej vody patrí okrem hygienickej nezávadnosti aj jej teplota. V budovách môžeme pozorovať trend znižovania spotreby vody vplyvom šetrenia vody konečnými užívateľmi. Neuvážené šetrenie pitnou vodou umožňujú aj úsporné výtokové armatúry, môže to však byť spojené s určitými hygienickými rizikami. V dôsledku nižšej spotreby pitnej vody dochádza k jej nedostatočnej výmene v potrubí, voda prúdi menšou rýchlosťou a limitné hodnoty teploty studenej pitnej vody vo vodovode sú prekračované.

2 POPIS SÚČASNÉHO STAVU

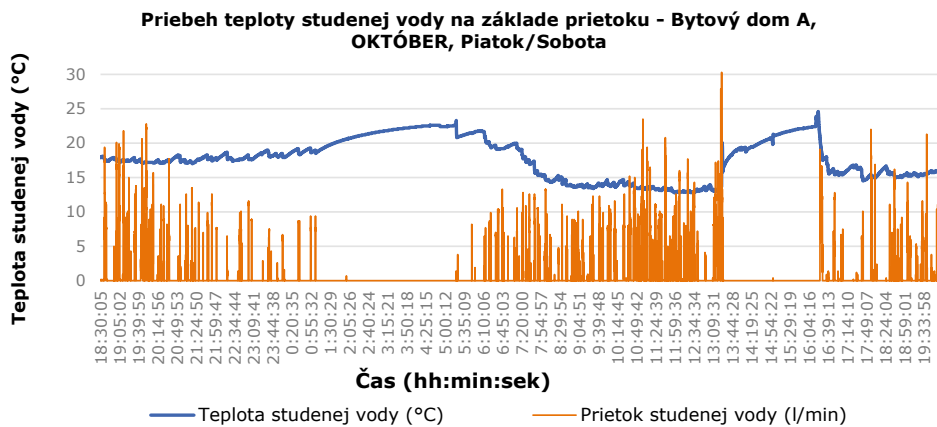
Výmena vody v potrubí je definovaná ako úplná výmena objemu vody obsiahnutého v príslušnej časti potrubia odobratím vody alebo jej vypustením. Systém by mal byť navrhnutý tak, aby bola zabezpečená dostatočná výmena vody v potrubí – vtedy bude zabezpečená aj vhodná teplota pitnej vody. Optimálna teplota studenej vody je dôležitá nielen z pohľadu komfortu konečných užívateľov, ale aj z hľadiska možného rizika rozmnožovania baktérií. Podľa STN EN 806-2 [1] nesmie byť po otvorení výtokovej armatúry studenej pitnej vody po 30-tich sekundách jej teplota vyššia ako 25 °C. Vyhláška MZ SR č. 247/2017 Z. z. [2] udáva ako odporúčaný rozsah teploty studenej vody od 8 do 12 °C. Aby sa zabránilo kolonizácii Legionelly, teplota vody musí byť v takom rozsahu, v ktorom sa baktéria nebude vôbec rozmnožovať, t.j. teplota vody musí byť nižšia ako 25 °C [3].

Pri dnešných kvalitných izoláciách potrubí by malo byť zabezpečenie správnej teploty pitnej vody samozrejmosťou. V systémoch vodovodu je stále častejšie, že teploty studenej vody sú nepripustne vysoké, čo môže viesť k šíreniu baktérií. Medzi príčiny vysokej teploty studenej vody vo vodovode vnútri budovy patria:

- fázy stagnácie vody v potrubí,
- nepravidelný odber vody z výtokových armatúr,
- sústreďovanie potrubí studenej vody v miestnostiach so zdrojmi tepla a v inštaláčnych priestoroch a šachtách v blízkosti teplovodných potrubí či svetidiel emitujúcich teplo,
- nedostatočná izolácia potrubí studenej vody,
- vysoká teplota studenej pitnej vody v potrubí vodovodu na vstupe do objektu.

Stagnácia vody v potrubí a jej vplyv na teplotu studenej vody

Pri distribúcii studenej pitnej vody v budove dochádza k jej stagnácii. Na to, aby bola zabezpečená požadovaná teplota pitnej vody je nutné zabezpečiť čo najčastejšiu výmenu v potrubí. Na Obr. 1 je zobrazený priebeh teploty a prietoku studenej vody pri experimentálnom meraní denného odberu vody v bytovom dome [4], ktorý poukazuje na priamu závislosť teploty studenej vody od jej prietoku. **Pri odbere vody je jej teplota konštantná, resp. sa znižuje. Ak však nedochádza k odberu vody v potrubí (voda stagnuje), studená voda sa ohrieva.** Veľmi dôležitá je teplota studenej vody na vstupe do objektu. Ak je teplota studenej vody na vstupe do objektu 20 °C, k prekročeniu limitnej hodnoty 25 °C dochádza veľmi rýchlo. Najkritickejšie sa to pri meraní v bytovom dome na Obr. 1 prejavilo v čase od 13:30 do 16.30, kedy teplota studenej vody stúpala zo 14 na 25 °C.



Obr. 1 Priebeh teploty a prietoku studenej pitnej vody v bytovom dome A, meranie vykonané pre 1 stúpacie potrubie pre 12 bytov, 30 obyvateľov [graf spracovala autorka na základe poskytnutých údajov zo zdroja [4]].

Nedostatočná výmena pitnej vody v kombinácii s nedostatočnou hrúbkou izolácie potrubia vodovodu pitnej vody spôsobuje prekračovanie prípustnej teploty studenej pitnej vody. Odporúčané hrúbky tepelnej izolácie potrubí studenej pitnej vody sú uvedené v Tab. 1.

Tab. 1 Odporúčaná minimálna hrúbka tepelnej izolácie potrubia studenej pitnej vody [5].

Uloženie potrubia	Hrúbka izolácie pri $\lambda = 0,040 \text{ W/(m.K)}$
Potrubie vedené v nevykurovaných miestnostiach, okolitá teplota $\leq 20 \text{ }^\circ\text{C}$	9 mm
Potrubie v šachtách, kanáloch a podhladoch, okolitá teplota $\leq 25 \text{ }^\circ\text{C}$	13 mm
Potrubie vedené v technickej miestnosti, v šachtách, kanáloch alebo zavesených podhladoch s tepelným zařízením s okolitou teplotou $> 25 \text{ }^\circ\text{C}$	Hrúbka rovná približne priemeru potrubia
Potrubia vedené v predstavených inštaláciách	4 mm alebo v ochrannej rúrke
Potrubia vedené v podlahe, vedené bez teplovodných potrubí	4 mm alebo v ochrannej rúrke
Potrubia vedené v podlahe, vedené súbežne teplovodnými potrubiami	13 mm

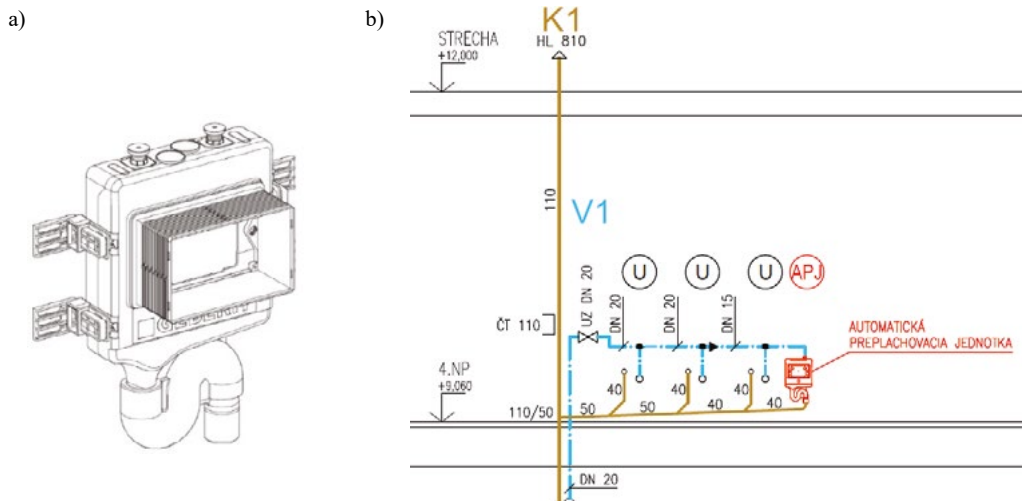
3 AUTOMATICKÉ PREPLACHOVACIE JEDNOTKY

Jedným z možných technických opatrení na zabezpečenie požadovanej výmeny a teploty vody v potrubí je návrh automatických preplachovacích jednotiek vodovodu. Voda v distribučnom systéme by mala byť vymenená minimálne 1x za týždeň [1]. Ak sa nedá zabezpečiť výmena vody 1x za týždeň otváraním jednotlivých výtokových armatúr, možnosťou je použitie automatickej preplachovacej jednotky (Obr. 2). Súčasťou systému je riadiaca jednotka, ktorá spustí prepláchnutie určitého úseku potrubia vodou podľa nastaveného programu. Technológia umožňuje preplachovacie jednotky konfigurovať a preplachovanie spúšťať na základe času, prietoku, teploty a spotreby vody. **Príklad prevádzkového režimu podľa teploty** je nasledovný:

Ak teplota v potrubí presiahne 25 °C, preplachovať pokiaľ teplota neklesne pod 20 °C.

Výhody nastavenia automatického preplachovania na základe teploty pitnej vody sú nasledovné:

- zabezpečenie požadovanej výmeny a teploty studenej vody,
- spoľahlivá kontrola teploty pitnej vody.



Obr. 2 Automatická preplachovacia jednotka (APJ)

a) konštrukčné vyhotovenie [6], b) schéma umiestnenie preplachovacej jednotky [autor].

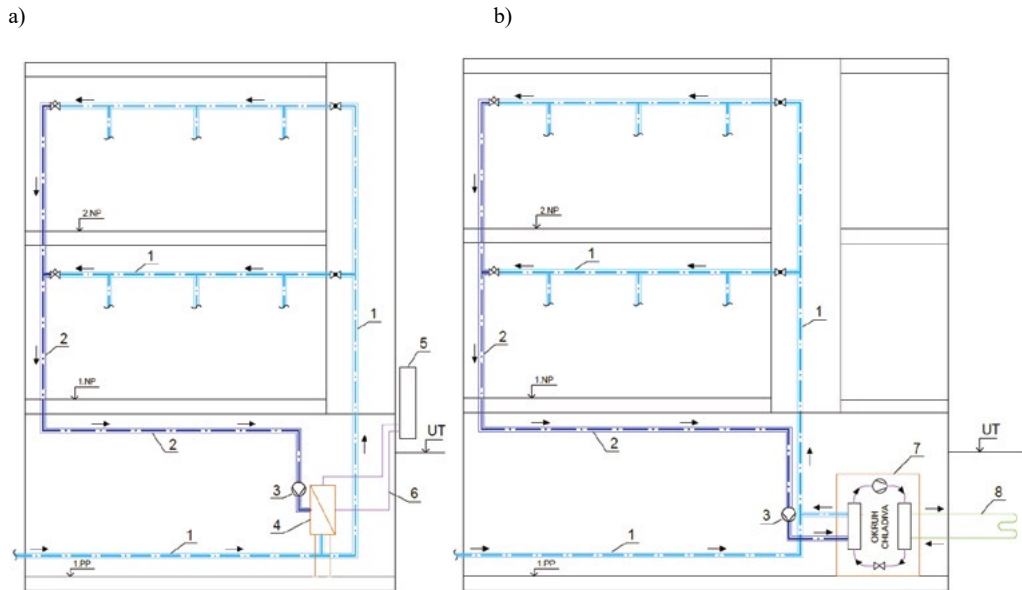
4 CIRKULÁCIA STUDENEJ VODY S CHLADENÍM

Pri automatických jednotkách hygienického preplachovania sa za účelom zabezpečenia dostatočnej výmeny vody v systéme voda vypúšťa do kanalizácie a dochádza k plytvaniu vzácnej pitnej vody. Tieto nevýhody sa dajú odstrániť návrhom systému cirkulácie studenej vody s jej chladením. Na Obr. 3 je principiálna schéma cirkulácie studenej vody v budove. Potrubie studenej vody je zokruhované do cirkulačného rozvodu, studená voda v tomto okruhu pomocou obehového čerpadla cirkuluje a udržuje sa jej požadovaná teplota. Inak by po čase stagnácie studenej pitnej vody dochádzalo k jej nahrievaniu. Cirkulačné potrubie studenej vody je vedené do technickej miestnosti, kde prebieha proces chladenia. Na chladenie studenej pitnej vody možno použiť:

- vonkajšiu jednotku klimatizácie (Obr. 3a),
- tepelné čerpadlo (napr. zem-voda, Obr. 3b),
- v závislosti od využitia budovy môžu byť už existujúce chladiace systémy v budove použité aj pre chladenie studenej vody [7].

Návrh systému cirkulácie studenej vody závisí od:

- zvolenej požadovanej výstupnej teploty studenej vody po ochladiení,
- teploty studenej vody pri vstupe do objektu,
- teploty prostredia v okolí potrubia studenej vody a cirkulácie,
- dĺžok a dimenzií potrubia [7].

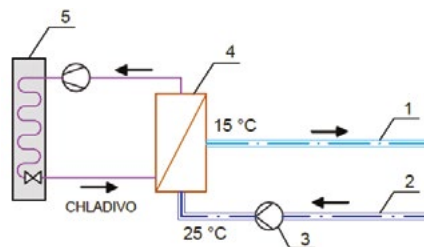


Obr. 3 Principiálna schéma systému cirkulácie studenej pitnej vody v budove
 a) s výmenníkom a vonkajšou klimatizačnou jednotkou [7, autor], b) s tepelným čerpadlom [autor].

1 – potrubie studenej vody, 2 – cirkulačné potrubie studenej vody, 3 – cirkulačné čerpadlo, 4 – výmenník,
 5 – klimatizačná jednotka, 6 – chladivo, 7 – tepelné čerpadlo typu ZEM-VODA, 8 – zemný kolektor.

4.1 Kompresorové chladenie studenej vody

Na Obr. 4 je zobrazený princíp kompresorového chladenia studenej vody pomocou vonkajšej klimatizačnej jednotky a výmenníka. Do výmenníka je pomocou cirkulačného čerpadla privádzaná studená pitná voda s nežiadúcou teplotou. Do výmenníka, z opačnej strany, je privádzané chladivo. Medzi studenou vodou a chladivom dochádza k výmene tepelnej energie, studená pitná voda sa ochladí a je distribuovaná do jednotlivých odberných miest. Chladivo, ktoré odovzdá svoju energiu studenej vode sa nahrieva, zvýši svoju teplotu a zmení skupenstvo z kvapalného na plynné. Prostredníctvom kompresora je chladivo stlačené, zvýši sa jeho tlak a teplota a je privedené do vonkajšej klimatizačnej jednotky. V klimatizačnej jednotke chladivo skondenzuje a vyzráža nadbytočné teplo do vonkajšieho prostredia čím zníži svoju teplotu. Prostredníctvom expanzného ventilu sa zníži tlak chladiva, skupenstvo chladiva sa zmení na kvapalné a následne je privádzané do výmenníka, kde ochladzuje studenú vodu. Na výstupe z výmenníka môže studená pitná voda dosahovať teploty v rozmedzí cca 10–15 °C.

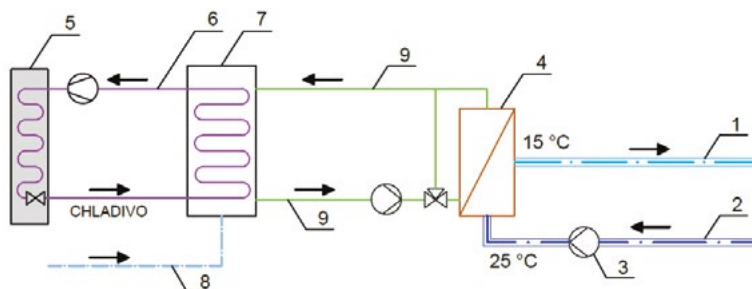


Obr. 4 Schéma kompresorového chladenia studenej vody s klimatizačnou jednotkou a výmenníkom [autor].

1 – potrubie studenej pitnej vody, 2 – cirkulačné potrubie studenej vody, 3 – cirkulačné čerpadlo, 4 – výmenník,
 5 – vonkajšia klimatizačná jednotka.

Rovnaký princíp chladenia studenej pitnej vody platí aj pri chladení pomocou tepelného čerpadla - napr. použitím tepelného čerpadla typu zem-voda chladivo odovzdá nadbytočné teplo nie do ovzdušia, ale do primárneho okruhu tepelného čerpadla - zemnému kolektoru (Obr. 3b).

Na Obr. 5 je zobrazený **princíp kompresorového chladenia studenej vody pomocou vonkajšej klimatizačnej jednotky, výmenníka a akumulačnej nádoby** [8]. Do akumulačnej nádoby sa napúšťa studená voda, ktorá je chemicky upravená, aby mala lepšiu schopnosť udržať chlad (voda v akumulačnej nádobe sa ďalej nazýva ako voda technologickej). Do akumulačnej nádoby technologickej vody je distribuované chladivo, v chladiacom okruhu. Technologickej voda je pomocou chladiča schladená a z akumulačnej nádoby privádza sa uzavretým okruhom do výmenníka. Do výmenníka je z opačnej strany privádzaná studená cirkulovaná voda s počiatočnou teplotou napr. 25 °C, ktorá sa ochladí v závislosti od výkonu klimatizačnej jednotky o 10 až 15 K.



Obr. 5 Principiálna schéma kompresorového chladenia studenej pitnej vody s klimatizačnou jednotkou, výmenníkom a akumulačnou nádobou [autor].

1 – potrubie studenej pitnej vody, 2 – potrubie cirkulácie studenej vody, 3 - cirkulačné čerpadlo, 4 – výmenník, 5 – vonkajšia klimatizačná jednotka, 6 – primárny chladiaci okruh (chladiivo), 7 - akumulačná nádoba technologickej vody, 8 – prívod technologickej vody do akumulačnej nádoby, 9 – okruh technologickej vody.

4.2 Solárne chladenie studenej vody

Ďalším spôsobom chladenia studenej pitnej vody môže byť solárne chladenie. Systémy solárneho chladenia sa rozdeľujú na:

- tepelne riadené solárne chladiace systémy,
- elektricky riadené solárne chladiace systémy.

Pri tepelne riadenom solárnom chladiacom systéme sa využíva tepelná energia získaná zo solárnych kolektorov na pohon chladiacich systémov. Tento systém pozostáva z fototermálneho systému (slné kolektory, zásobník, výmenník, riadiaca jednotka, potrubia), ktorý je doplnený chladiacim zariadením poháňaným teplom. V tomto procese sa slnečné teplo akumuluje a využíva na tepelno-riadený chladiaci proces v budove. Druhom solárneho tepelného chladenia je chladenie absorpčné. Princíp absorpčného chladenia sa podobá na klasické kompresorové chladenie popísané vyššie, rozdiel je len v spôsobe získavania vyššieho tlaku pár chladiča potrebného na kondenzáciu. Pri kompresorovom chladení sa vyšší tlak dosahuje stlačením pár chladiča v kompresore (väčšinou elektricky poháňaný), ktorý je energeticky najnáročnejšou súčasťou chladiaceho zariadenia. Pri systéme absorpčného chladenia sa kompresia pár chladiča dosahuje termickým princípom s využitím solárneho tepla [9].

Pri elektricky riadených systémoch rozlišujeme fotovoltický kompresorový a fotovoltický Peltier systém. Pri fotovoltickom kompresorovom systéme sa využívajú fotovoltické panely na výrobu elektrickej energie, ktorá poháňa elektrický kompresor chladiaceho zariadenia. Vyrobená elektrická energia z fotovoltických článkov môže slúžiť aj na pohon cirkulačného čerpadla studenej pitnej vody. Pri fotovoltickom Peltier systéme sa využívajú Peltierove články (Obr. 6a). Peltierov článok je elektronický prvok, ktorý pri pretekaní elektrického prúdu vyvinie rozdielne teploty na stykových plochách dvoch vodičov - ak sa privedie na vyvedené vodiče jednosmerný prúd, začne sa jedna strana ochladzovať a druhá zahrievať (Obr. 6b). Na studenej strane môže byť umiestnená napr. akumulačná nádoba studenej vody za účelom jej chladenia. Teplo sa bude odovzdávať na druhej strane, napr. prostredníctvom chladiča, ktorý stratové teplo odvádza ventilátorom do priestoru. Ďalšou možnosťou je inštalácia zostavy termoelektrického chladenia typu L-L (liquid to liquid, Obr. 6c), ktorej vrchnú časť tvorí výmenník, kde by sa na vstupe privádzala cirkulovaná studená pitná voda a na výstupe z výmenníka by bola studená pitná voda ochladená, určená k distribúcii konečným užívateľom. Stratové teplo je pri tomto type zostavy odvedené teplovodnou kvapalinou v spodnom výmenníku. Fotovoltické panely by v tomto prípade slúžili na dodávku energie pre napájací zdroj Peltierových článkov. Výhodami Peltierových článkov je ich kompaktná veľkosť a absencia pohybujúcich sa častí resp. chladiaceho média. Nevýhodou solárneho systému chladenia je nekontinuálna výroba elektrickej energie počas noci a počas zamračených dní.



Obr. 6 Peltierov článok na účely chladenia [10];

a) pohľad [10], b) princíp činnosti [11], c) zostava termoelektrického chladenia typu L-L (liquid to liquid) [10].

5 DISKUSIA

Pitná voda je zdravotne nezávadná ak pri jej používaní neohrozí zdravie prítomnosťou mikroorganizmov. Potrubia je nutné navrhovať tak, aby nedochádzalo vzájomnému prechodu tepla medzi studenou vodou a teplovodnými potrubiami či okolitým prostredím. Všetky potrubia je nutné dôkladne tepelne izolovať. Pri objektoch, kde nie je zabezpečený odber vody aspoň 1x za týždeň sa odporúčajú navrhovať automatické preplachovacie jednotky. Ak je na vstupe do objektu vysoká teplota studenej vody, vhodné je navrhnúť systém cirkulácie a chladenia studenej pitnej vody a distribuovať konečným užívateľom studenú pitnú vodu v dostatočnej kvalite.

6 ZÁVER

Vysoká teplota studenej pitnej vody vo vodovode na vstupe objektu v kombinácii s nedostatočnou tepelnou izoláciou potrubia a s nízkym prietokom studenej vody spôsobuje prekračovanie limitných hodnôt teploty pitnej vody v budove. Systém cirkulácie studenej vody s jej chladením u nás doposiaľ nie je rozšírený, tento systém by však vyriešil všetky problémy spojené s nedostatočnou výmenou a teplotou studenej pitnej vody. Na chladenie studenej pitnej vody v objekte je možné využiť niekoľko obnoviteľných zdrojov popísaných v príspevku.

PodĎakovanie

Príspevok bol podporovaný Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR prostredníctvom grantov VEGA 1/0847/18 a KEGA 044STU-4/2018.

Použité zdroje

- [1] STN EN 806 -2: Technické podmienky na zhotovovanie vodovodných potrubí na pitnú vodu vnútri budov, časť 2 - Navrhovanie. 2005.
- [2] Vyhláška MZ SR č. 247/2017 Z. z., ktorou sa ustanovujú podrobnosti o kvalite pitnej vody, kontrole kvality pitnej vody, programe monitorovania a manažmente rizík pri zásobovaní pitnou vodou.
- [3] TNI CEN/TR 16 355: Preventívne opatrenia proti rozmnožovaniu baktérie Legionella vo vodovodných potrubíach na pitnú vodu vnútri budov
- [4] M. Krafčík: Prietoky a spotreba vody v bytových domoch a využitie stratifikácie pri príprave teplej vody. In: Dizertačná práca, Stavebná fakulta STU v Bratislave, 2019
- [5] DIN 1988-200, Technische Regeln für Trinkwasser – Installationen. Tabelle 8.
- [6] GEBERIT - Hygienické prepláchnutie Geberit [online: www.geberit.sk]
- [7] HEINECKE, O.: Kaltwasser-Zirkulation mit Kühlung. In: Forum wasserhygiene Kongres, 2019
- [8] KEMPER GMBH + CO. KG: Kaltwasser-Zirkulation mit KHS CoolFlow [online: www.kemper-olpe.de]
- [9] MICHALIČKOVÁ S: Solárne chladenie v budovách s využitím slnečnej energie, ASB portál [online]
- [10] LAIRD THERMAL SYSTEMS: Thermoelectric Coolers [online: www.lairdthermal.com]
- [11] M. Murgaš: Konštrukcia termoelektrického chladiaceho zariadenia. In: Bakalárska práca, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015

KVALITA VNÚTORNÉHO PROSTREDIA V BYTOVÝCH JEDNOTKÁCH V RÔZNYCH ETAPÁCH INTERIÉROVÝCH ÚPRAV

INDOOR ENVIRONMENTAL QUALITY OF APARTMENTS UNITS IN DIFFERENT STAGES OF INTERIOR CONSTRUCTION

Katarína Harčárová^{*,1}

*katarina.harcarova@tuke.sk

¹Ústav environmentálneho inžinierstva, Stavebná fakulta, Technická univerzita v Košiciach, Vysokoškolská 4, 042 00 Košice, Slovenská republika

Abstrakt

Predkladaný príspevok sa zaoberá hodnotením kvality vnútorného prostredia (IEQ) v dvoch apartmánových jednotkách nachádzajúcich sa v rôznych štádiách interiérových úprav - v štádiu holobytu a vo finálnom štádiu zariadeného bytu. Výsledky monitoringu IEQ potvrdili minimálne rozdiely medzi holobytom a kompletne zariadeným bytom z hľadiska tepelno-vlhkostnej mikroklímy. Priemerné koncentrácie tuhých častíc dvoch reprezentatívnych frakcií (PM_{2,5} a PM₁₀) boli vyššie v prípade holobytu. Naopak vyššie koncentrácie celkových prchavých organických zlúčenín (TVOC) boli zaznamenané v prípade zariadeného bytu. Legislatívny limit pre PM₁₀ (50 µg/m³) a maximálna odporúčaná Mølhaveho hodnota (200 µg/m³) pre TVOC boli niekoľkonásobne prekročené v oboch bytoch. V prípade holobytu sú pracovníci vystavení nielen zvýšeným koncentráciám TVOC, ale aj zvýšeným koncentráciám PM₁₀, a preto by mali dbať na ochranu a bezpečnosť zdravia pri práci. Podrobnejší monitoring zameraný na identifikáciu a stanovenie vytyčených VOCs preukázal prítomnosť xylénov a etylbenzenu vo vnútornom ovzduší holobytu. Okrem xylénov a etylbenzenu bol v zariadenom byte prítomný aj toluén. Koncentrácie týchto zlúčenín boli pod legislatívnymi limitmi, okrem etylbenzenu, pre ktorý nie sú stanovené žiadne legislatívne limity. Z uvedeného vyplýva, že ďalšia povrchová úprava a vybavenie bytu prispievajú k zvýšeniu hladín VOCs vo vnútornom prostredí.

Kľúčové slová

Kvalita vnútorného prostredia, rezidenčná novostavba, interiérové úpravy, fyzikálno-chemické parametre

Abstract

The presented paper deals with the evaluation of the indoor environmental quality (IEQ) in two apartment units in different stages of interior construction - in the initial state and in the final state of a completely furnished apartment. The results of IEQ monitoring confirmed the minimal differences between an unfurnished apartment and a fully furnished apartment in terms of thermal-humidity microclimate. The average particulate matter concentrations of the two representative fractions (PM_{2,5} and PM₁₀) were higher for apartment in the initial state. On the contrary, higher concentrations of total volatile organic compounds (TVOC) were recorded in the case of a furnished apartment. The legislative limit for PM₁₀ (50 µg/m³) and the maximum recommended Mølhave value (200 µg/m³) for TVOC were exceeded several times in both apartments. In the case of unfurnished apartment, workers are exposed not only to increased concentrations of TVOC, but also to increased concentrations of PM, and should therefore pay attention to the protection and safety of health at work. More detailed monitoring aimed at identifying and determining the target VOCs showed the presence of xylenes and ethylbenzene in the indoor air of an unfurnished apartment. In addition to xylenes and ethylbenzene, toluene was present in the furnished apartment. Concentrations of these compounds were below legislative limits, except for ethylbenzene, for which no legislative limits are set. It follows from the above that further surface treatment and furnishing of the apartment contributes to increasing the level of VOCs in the indoor environment.

Key words

Indoor environmental quality, residential building, interior construction, physico-chemical parameters

1 ÚVOD

Človek strávi viac ako 90% svojho času vo vnútornom prostredí, v ktorom je vystavený škodlivým polutantom rôzneho pôvodu [1, 2]. Medzi najzávažnejšie polutanty vyskytujúce sa vo vnútornom prostredí patria prchavé organické zlúčeniny (VOCs). Tieto zlúčeniny sú monitorované kvôli ich negatívnemu dopadu na ľudské zdravie. Niektoré z nich vstupujú do vnútorného prostredia budov z vonkajších zdrojov, ale väčšina pochádza z vnútorných zdrojov. Zvýšenú prítomnosť prchavých organických zlúčenín možno pozorovať najmä v novopostavených alebo zrekonštruovaných budovách [3, 4]. Za hlavné zdroje VOCs v interiéroch novopostavených alebo zrekonštruovaných budov sú považované práve použité stavebné materiály. Obzvlášť počas kompletizácie prechádza interiér rôznymi etapami úprav, ale len zriedka sa vie, v ktorých z týchto etáp dôjde k najväčšiemu uvoľňovaniu VOCs a najmä konkrétne akým látkam môžu byť vystavení nielen užívatelia bytov, ale aj samotní pracovníci vykonávajúci tieto úpravy. Doteraz bolo publikovaných iba niekoľko štúdií zaoberajúcich sa kontamináciou vnútorného prostredia v rôznych fázach interiérových úprav. Takmer všetky tieto štúdie sú zamerané na hodnotenie IEQ z hľadiska prítomnosti prchavých organických zlúčenín. V štúdií podľa Parka a kol. vykonali niekoľko meraní v novopostavenom bytovom komplexe v Kórei. V rámci týchto meraní zaznamenali, že práve nábytok bol hlavným zdrojom emisií toluénu a formaldehydu [5]. Ochs a kol. uvádzajú že lakovanie dverí je zodpovedné za vysoké emisie acetónu a iných karbonylových zlúčenín [6]. Gallon a kol. merali koncentrácie VOCs počas šiestich fáz výstavby na dvoch stavbách. Výsledky ukázali, že IAQ nezávisí len od emisii zo stavebných materiálov, ale úzko súvisí aj s celkovým procesom implementácie [7]. Liang a kol. merali koncentrácie VOCs počas piatich etáp výstavby nového bytu a zistili, že po osadení dverí a zárubní sa výrazne zvýšili koncentrácie toluénu, α -pinénu a etylbenzénu. Rovnako sa zvýšili koncentrácie propylénglykolu po nanosení farby na steny a benzénu po vybavení bytu nábytkom [8]. Vo svojej ďalšej štúdií Liang monitoroval VOCs v ôsmich fázach výstavby v bytovej jednotke obytného bloku v čínskom Nankingu. V tomto prípade výsledky ukázali, že koncentrácie VOC boli vyššie pre tzv. fázy „suchého“ materiálu (dokončené tesárom) ako pre fázy „mokrého“ materiálu (dokončené maliarom). V každej etape výstavby boli hojne zastúpené práve alkány [9].

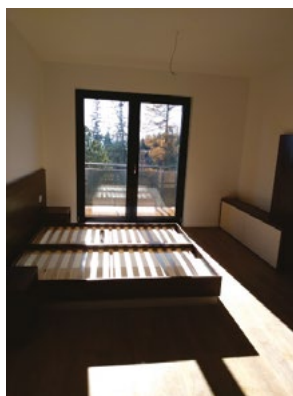
Ďalšou skupinou polutantov, vyskytujúcou sa vo vnútornom prostredí, sú tuhé častice. Počas výstavby sa vyprodukuje veľké množstvo tuhých častíc, ktoré môžu v novostavbe stále pretrvávajúť aj niekoľko týždňov po jej uzatvorení. Napriek tomu je dostupných len málo informácií, zaoberajúcich sa kontamináciou vnútorného ovzdušia tuhými časticami v etapách interiérovej výstavby. Z tohto dôvodu je cieľom tohto príspevku poukázať na to, do akej miery jednotlivé etapy interiérových úprav ovplyvňujú kvalitu vnútorného prostredia a presne určiť akým koncentraciám PM a VOCs sú vystavení nielen užívatelia bytov pred nasťahovaním, ale aj samotní pracovníci počas realizácie jednotlivých interiérových úprav. Okrem uvedených dvoch chemických parametrov, sú v tomto príspevku hodnotené základné fyzikálne parametre, akými sú teplota, relatívna vlhkosť a rýchlosť prúdenia vzduchu.

2 POPIS HODNOTENÝCH BYTOVÝCH JEDNOTIEK

Monitoring kvality vnútorného prostredia bol uskutočnený v novostavbe rezidenčného objektu, ktorý je situovaný na východnom Slovensku v rekreačnej oblasti Štrba (Vysoké Tatry). Objekt pozostáva zo železobetónovej konštrukcie. Merania a odbery vzoriek boli realizované v dvoch apartmánových jednotkách, ktoré sa nachádzali v rôznych štádiách interiérových úprav. Prvá apartmánová jednotka, ktorá sa nachádza na treťom poschodí, bola v počiatočnej fáze nezariadeného holobytu, v ktorej boli povrchy stien a stropu omietnuté za použitia sadrovej omietky. V prípade druhej apartmánovej jednotky išlo o zariadený jednoizbový byt nachádzajúci sa na druhom poschodí. V tomto byte bola nainštalovaná laminátová podlaha a povrchy stien a stropu boli upravené aplikovaním sadrovej omietky a dekoračného náteru. Interiér bol vybavený základným nábytkom (posteľ, nočný stolík, skriňa, obývacia stena) a kuchynskou linkou z drevotriesky, keďže obývacia miestnosť bola priamo spojená s kuchyňou. Oba sledované byty sú zobrazené na obrázku 1. Jednotlivé byty sú od seba oddelené železobetónovými nosnými priečkami, ale aj nenosnými akustickými sadrokartónovými priečkami. Byty sú vybavené hliníkovými balkónovými dverami pozostávajúcimi z izolačných bezpečnostných trojskiel a protipožiarovými a bezpečnostnými vstupnými dverami s laminátovým povrchom.



Holobyť



Zariadený byt

Obr.1 Vybrané byty, v ktorých bolo vykonané monitorovanie vnútorného ovzdušia.

3 METODIKA

Parametre tepelno-vlhkostnej mikroklimy (teplota vzduchu, relatívna vlhkosť a rýchlosť prúdenia vzduchu), boli stanovené pomocou multifunkčného prístroja TESTO 435-4 s príslušnou sondou (Testo, Inc.; Nemecko). Koncentrácie tuhých častíc v rozmedzí frakcií 0,5 až 10 μm ($\text{PM}_{0,5}$ – PM_{10}) boli stanovené pomocou meracieho zariadenia HANDHELD 3016 IAQ (Lighthouse Worldwide Solutions, Inc., USA), ktorý využíva laser-diódový svetelný zdroj a zbernú optiku pre detekciu častíc. Koncentrácie TVOC boli stanovené fotoionizačným detektorom s UV lampou ppbRAE 3000 (RAE Systems, Inc.; USA). Dvojbodová kalibrácia, nulová a štandardného referenčného plynu (izobutylénu), bola vykonaná pred samotným meraním. Všetky namerané koncentrácie boli vyjadrené v ekvivalentoch toluénu (korekčný faktor uvádzaný výrobcom je 0,5). Sondy a uvedené meracie prístroje boli umiestnené približne v strede miestnosti vo výške cca 1,1 m od podlahy. Parametre tepelno-vlhkostnej mikroklimy, PM a TVOC boli zaznamenávané v jednominútových intervaloch. Aktívny odber vytýčených VOCs prebiehal po dobu 6 hodín. Vzorka ovzdušia bola zachytávaná do sorpčnej trubičky Anasorb CSC pomocou odberového čerpadla SKC PocketPump TOUCH. Po odobratí bola vzorka ďalej analyzovaná v externom laboratóriu prostredníctvom plynovej chromatografie. Merania prebiehali v polovici septembra v roku 2020. Počas celého monitoringu nedochádzalo vo vybraných bytoch k výmene vzduchu.

4 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Štatistické vyhodnotenie nameraných dát pre oba apartmány je zhrnuté v tabuľke 1. Uvedené výsledky boli zároveň porovnané s požiadavkami pre tepelno-vlhkostnú mikroklimu a limitnými hodnotami škodlivých faktorov vo vnútornom ovzduší danými v Vyhláske MZ SR č. 259/2008 [10].

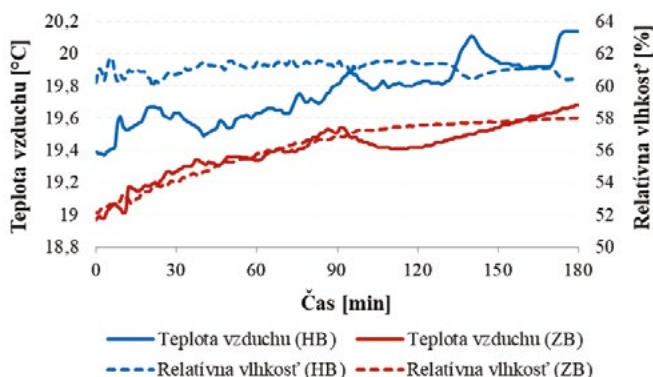
Tab. 1 Štatistické vyhodnotenie nameraných dát.

	Štatistika	Teplota [°C]	Relatívna vlhkosť [%]	Rýchlosť prúdenia vzduchu [m/s]	$\text{PM}_{2,5}$ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]]	PM_{10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	TVOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Holobyť	<i>Priemer</i>	19,76	61,09	0,00	21,10	564,72	910
	<i>Min</i>	19,37	59,95	0,00	17,50	244,02	509
	<i>Max</i>	20,14	61,69	0,23	24,32	907,42	1134
	<i>SO</i> ¹	0,18	0,37	0,02	1,62	171,63	178,49
Zariadený byt	<i>Priemer</i>	19,40	56,22	0,00	4,67	68,15	1955
	<i>Min</i>	18,97	52,13	0,00	3,88	43,85	1206
	<i>Max</i>	19,68	58,02	0,07	5,57	104,31	2407
	<i>SO</i> ¹	0,16	1,73	0,01	0,28	13,82	320,27

¹ Smerodajná odchýlka

Tepelno-vlhkostná mikroklima

Priemerné hodnoty teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu namerané v oboch apartmánových jednotkách sa od seba výrazne neodlišovali. Rozdiel medzi priemernou relatívnou vlhkosťou vzduchu v holobyte a v zariadenom apartmáne predstavoval 5%. Hodnoty relatívnej vlhkosti sa v oboch apartmánoch nachádzali v požadovanom legislatívnom rozsahu 30–70%. Na obrázku 2 sú znázornené priebehy teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu vo zvolených apartmánových jednotkách počas celej doby merania. V zariadenom apartmáne mali hodnoty relatívnej vlhkosti vzduchu tendenciu plynule narastať, zatiaľ čo v holobyte zväčša kolísali okolo jednej hodnoty. Prípustná hodnota rýchlosti prúdenia vzduchu nepresiahla prípustný legislatívny limit $0 \leq 0,2$ m/s ani v jednom z monitorovaných apartmánov.

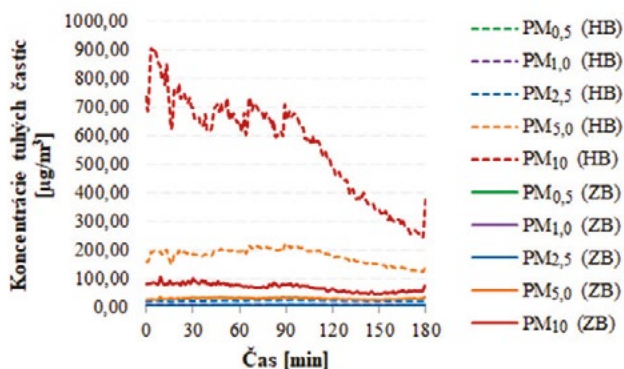


Obr. 2 Záznam z meraní teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v oboch apartmánoch.

Koncentrácie tuhých častíc

Priebeh koncentrácií tuhých častíc všetkých sledovaných frakcií v holobyte a zariadenom byte je znázornený na obrázku 3. Možno konštatovať, že koncentrácie nižších frakcií ($PM_{0,5}$ – $PM_{1,0}$) nemali tendenciu výrazne kolísať, na rozdiel od vyšších frakcií ($PM_{2,5}$ – PM_{10}). Rozdiel medzi maximálnou a minimálnou nameranou koncentráciou nebol v prípade frakcií 0,5 a 1,0 μm vyšší ako 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ v žiadnom z bytov. Koncentrácie tuhých častíc v rozmedzí $PM_{2,5}$ – PM_{10} už mali o čosi kolísavejší priebeh. Kolísanie koncentrácií $PM_{5,0}$ a PM_{10} v prvej polovici merania bolo zrejme spôsobené prítomnosťou dvoch osôb (pracovníkov vykonávajúcich meranie) v miestnosti. V druhej polovici merania bol zaznamenaný pomaly pokles týchto koncentrácií, nakoľko v tomto čase prebiehal monitoring už bez prítomnosti osôb.

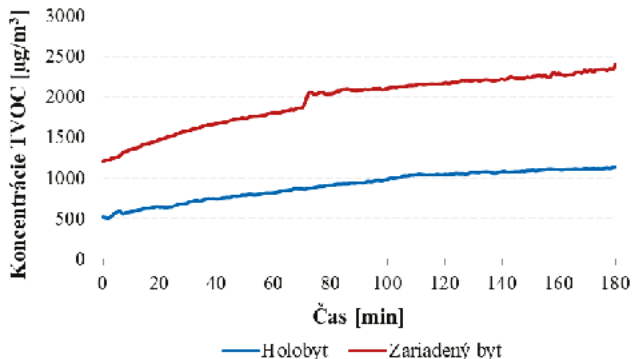
Priemerné koncentrácie dvoch reprezentatívnych frakcií $PM_{2,5}$ a PM_{10} dosahovali v zariadenom byte hodnoty 4,67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 68,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pričom koncentrácie $PM_{2,5}$ sa pohybovali od 3,88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ do 5,57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a koncentrácie PM_{10} od 43,85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ do 104,31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Najvyššia prípustná hodnota koncentrácií tuhých častíc PM_{10} je podľa Vyhlášky MZ SR 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Táto limitná hodnota bola v prípade tejto apartmánovej jednotky prekročená o 27%, keďže meranie prebiehalo v budove novostavby, v ktorej ešte stále prebiehali interiérové úpravy. Naopak v holobyte sa koncentrácie $PM_{2,5}$ pohybovali v rozmedzí od 17,50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ do 24,32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a koncentrácie PM_{10} od 244,02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ do 907,42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Priemerná koncentrácia tuhých častíc pre frakciu $PM_{2,5}$ bola 21,10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a pre PM_{10} 564,72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Síce v tejto etape výstavby ešte byt nie je obývatel'ný, zo zdravotného hľadiska je dôležité vedieť akým koncentráciám PM_{10} môžu byť ľudia vystavení, už len pri ďalšej práci alebo krátkodobom výskyte v takomto prostredí. V tomto prípade bola stanovená limitná hodnota prekročená až o 91%. Počas prítomnosti osôb v miestnosti bola priemerná koncentrácia PM_{10} v holobyte 709,10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, čo predstavuje 93% prekročenie legislatívneho limitu. V zariadenom byte dosahovala koncentrácia PM_{10} hodnotu 79,22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, čo zase predstavuje 37% prekročenie legislatívneho limitu.



Obr. 3 Priebeh koncentrácií $PM_{0,5}$ – PM_{10} v oboch monitorovaných jednotkách - v holobyte (HB) a zariadenom byte (ZB).

Koncentrácie prchavých organických látok

Z obrázku 4 vyplýva, že koncentrácie TVOC mali v oboch monitorovaných jednotkách rastúci trend, keďže v priebehu celého merania boli okná a dvere zatvorené. Priemerná koncentrácia TVOC v zariadenom byte bola $1955 \mu\text{g}/\text{m}^3$, čo predstavuje 54% zvýšenie oproti holobytu, v ktorom dosahovala priemerná koncentrácia TVOC hodnotu $910 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Odporúčaná koncentrácia TVOC podľa Mølhaveho [11], ktorá ešte nespôsobuje diskomfort ani nežiaduce zdravotné účinky o hodnote $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bola v prípade holobytu prekročená o 78% a v prípade zariadeného apartmánu o 90%. Prítomnosť osôb v miestnosti sa neodrazila na koncentráciách TVOC v monitorovaných apartmánoch.



Obr. 4 Priebeh koncentrácií TVOC v holobyte a zariadenom byte.

Okrem stanovenia celkových VOCs bola zároveň vykonaná aj identifikácia a stanovenie vybraných organických zlúčenín, uvedených vo Vyhláske MZ SR. Tá sa zameriava na prítomnosť štyroch prioritných organických zlúčenín vo vnútornom prostredí budov, a to konkrétne toluénu, sumy troch xylénov, styrenu a tetrachlóretylénu, ktoré majú nežiaduce účinky na zdravie ľudí. Výsledky analýzy vybraných VOCs pre obe fázy interiérových úprav sú zhrnuté v tabuľke 2. Z uvedených štyroch zlúčenín, boli v holobyte prítomné len xylény, ktorých koncentrácie sa nachádzali pod legislatívnym limitom $4800 \mu\text{g}/\text{m}^3$. V zariadenom apartmáne bola suma troch xylénov sice 3-násobne vyššia ako v nezariadenom apartmáne, ale stále sa nachádzala pod legislatívnym limitom. V tomto byte bola navyše preukázaná prítomnosť toluénu. Avšak táto koncentrácia sa taktiež nachádzala pod limitnou hodnotou $8000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Prítomnosť styrenu a tetrachlóretylénu nebola potvrdená ani v jednom z monitorovaných apartmánov, keďže koncentrácie týchto dvoch látok sa nachádzali pod detekčnými limitmi. V prípade holobytu, môžu uvedené zlúčeniny pochádzať z emisií zo sadrokartónu a z tmeliacej pasty používanej pri montovaní sadrokartónu. Tiež nie je vylúčené, že tieto VOCs pochádzajú z osadených dverí. Naopak vo vnútornom prostredí zariadeného apartmánu je už o čosi komplikovanejšie definovať konkrétne zdroje zistených VOCs,

naoľko zdrojom týchto látok môže byť nábytok, rovnako ako aj použité dekoratívne nátery. V oboch apartmánoch bola navyše zistená prítomnosť etylbenzénu. Pre túto zlúčeninu legislatíva neuvádza jej limitnú koncentráciu vo vnútornom prostredí budov, avšak dlhodobé vystavenie zvýšeným koncentráciám môže mať dráždivé účinky na ľudský organizmus. V porovnaní s nezariadeným apartmánom bola jeho koncentrácia v zariadenom apartmáne vyššia o 78,2%. Najčastejším zdrojom etylbenzénu vo vnútornom prostredí budov sú materiály používané na úpravu stien [13].

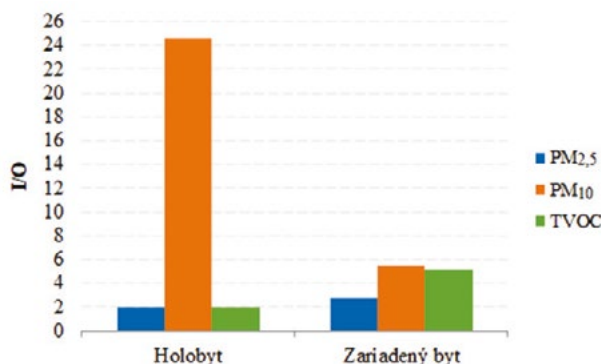
Tab. 2 Koncentrácie vybraných prchavých organických zlúčenín.

	Holobyť	Zariadený byt
Toluén [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	< LOD ²	78,34
Xylény [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	51,19	171,63
Styrén [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	< LOD ²	< LOD ²
Tetrachlóretylén [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	< LOD ²	< LOD ²
Etylbenzén [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	17,27	79,25

² LOD - Limit detekcie

I/O pomery pre PM_{2,5}, PM₁₀ a TVOC

Keďže monitoring prioritných polutantov prebiehal v budove novostavby, v ktorej ešte stále prebiehali stavebné úpravy, je zrejmé že vo vnútornom prostredí budú dominovať prevažne zdroje vnútorného prostredia. Pre potvrdenie tohto tvrdenia boli súčasne vykonané aj trojhodinové merania kvality vonkajšieho ovzdušia. Pomer koncentrácií polutantov vnútorného a vonkajšieho ovzdušia (I/O) je dôležitým indikátorom na identifikáciu pôvodu rôznych polutantov. Rôzne štúdie uplatňujú rôzne metódy hodnotenia tohto pomeru [12, 13]. V tejto štúdií boli I/O pomery generované konvenčným spôsobom, kedy je vonkajší vzduch v blízkosti budovy monitorovaný súčasne s vnútorným ovzduším. Do tohto pomeru bola teda dosadená stredná hodnota koncentrácií jednotlivých polutantov (PM_{2,5}, PM₁₀ a TVOC) nameraných vo vnútornom ovzduší (I) po dobu troch hodín a k nej príslušná stredná hodnota koncentrácií týchto polutantov zaznamenaná vo vonkajšom ovzduší (O). Vyššia hodnota I/O pomeru znamená väčší príspevok z interných zdrojov. V prípade ak je I/O < 1 pochádzajú vybrané polutanty z vonkajších zdrojov, v prípade ak je I/O > 1 z vnútorných zdrojov. Z Obr. 5 vyplýva, že všetky sledované polutanty pochádzajú prevažne z vnútorných zdrojov, či už sa jedná o holobyť alebo zariadený apartmán. Vyšší prírastok úrovni TVOC a PM_{2,5} ale možno sledovať v prípade zariadeného bytu. Naopak, v holobyte možno pozorovať extrémne zvýšenie úrovni PM₁₀.



Obr. 5 Pomer vybraných vnútorných a vonkajších polutantov.

5 ZÁVER

Po vyhodnotení výsledkov možno konštatovať, že výsledné hodnoty parametrov tepelno-vlhkostnej mikroklimy boli pre oba byty porovnateľné. Tieto hodnoty boli súčasne v rámci požadovaných legislatívnych limitov. Priemerné koncentrácie tuhých častíc v dvoch reprezentatívnych frakciách (PM_{2,5} a PM₁₀) boli výrazne odlišné pre oba apartmány. V prípade holobytu bol niekoľkokrát prekročený prípustný legislatívny limit koncentrácií PM₁₀, a preto by mali pracovníci pri ďalších prácach v tomto byte dbať na ochranu a bezpečnosť zdravia. Koncentrácie TVOC presiahli v oboch apartmánoch odporúčaný Mølhavého limit 200 µg/m³. V zariadenom byte bola priemerná koncentrácia TVOC až o polovicu vyššia ako v holobyte. V rámci monitorovania VOCs bola zároveň vykonaná podrobnejšia analýza vnútorného ovzdušia zameraná na identifikáciu a stanovenie štyroch vybraných VOCs (xylénov, toluénu, tetrachlóretylénu a styrénu) uvedených vo Vyhláske MZ SR. Z týchto zlúčenín bol v holobyte prítomný iba xylén. V zariadenom byte bol okrem xylénov identifikovaný aj toluén. Koncentrácie týchto VOCs sa nachádzali pod legislatívnymi limitmi. Zároveň bola v oboch bytoch zistená prítomnosť etylbenzénu, na ktorý sa nevzťahujú žiadne legislatívne požiadavky. Prítomnosť tetrachlóretylénu a styrénu sa nepotvrdila v žiadnom z bytov. Jednoznačná identifikácia potenciálnych zdrojov detegovaných VOCs je v tomto prípade zložitá a vyžaduje si ešte podrobnejšie preskúmanie jednotlivých zásahov, ktorými byt počas výstavby prechádza. Skutočnosť, že znečistenie vnútorného prostredia v oboch apartmánoch pochádza hlavne z vnútorných zdrojov, potvrdili aj výsledky hodnotenia I/O pomerov. Monitorovanie vybraných fyzikálno-chemických parametrov IEQ dopadlo pre obe etapy interiérových úprav podľa predpokladov s možnosťou kvantifikovať presne koncentrácie jednotlivých znečisťujúcich látok, ktorým môžu byť vystavení nielen ich noví užívatelia, ale aj samotní pracovníci. Predpokladá sa, že aj keby boli jednotlivé fázy hodnotené v tom istom byte, výsledky by sa pravdepodobne výrazne nelíšili od výsledkov uvedených v tomto príspevku.

PodĎakovanie

Tento príspevok bol finančne podporený grantom VEGA číslo 1/0512/20.

Použité zdroje

- [1] CAKMAK, Sabit, Robert E. DALES, Ling LIU, Lisa Marie KAURI, Christine L. LEMIEUX, Christopher HEBBERN a Jiping ZHU. Residential exposure to volatile organic compounds and lung function: Results from a population-based cross-sectional survey. *Environmental Pollution*. 2014, 194, 145-151. ISSN 02697491.
- [2] YIN, Haiguo, Chunxue LIU, Leiming ZHANG, Angui LI a Zhenjun MA. Measurement and evaluation of indoor air quality in naturally ventilated residential buildings. *Indoor and Built Environment*. 2019, 28(10), 1307-1323. ISSN 1420-326X.
- [3] FÖLDVÁRY, Veronika, Gabriel BEKÖ, Sarka LANGER, Karine ARRHENIUS a Dušan PETRÁŠ. Effect of energy renovation on indoor air quality in multifamily residential buildings in Slovakia. *Building and Environment*. 2017, 122, 363-372. ISSN 03601323.
- [4] DU, Liuliu, Virpi LEIVO, Tadas PRASAUSKAS, Martin TÄUBEL, Dainius MARTUZEVICIUS a Ulla HAVERINEN-SHAUGHNESSY. Effects of energy retrofits on Indoor Air Quality in multifamily buildings. *Indoor Air*. 2019. ISSN 0905-6947.
- [5] PARK, Jin Chul, Young Cheol KWON a Hyun Do JUN. A Study on the Improvement of Indoor Air Quality of Newly-Built Apartment Houses Using Low Emission Building Materials. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2018, 10(1), 235-240. ISSN 1346-7581.
- [6] OCHS, Soraya de Mendonça, Leonardo de Almeida FURTADO, Wildson Vieira CERQUEIRA a Annibal Duarte PEREIRA NETTO. Characterization of the variation of carbonyl compounds concentrations before, during, and after the renovation of an apartment at Niterói, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016, 23(15), 15605-15615. ISSN 0944-1344.
- [7] GALLON, Victoria, Pierre LE CANN, Mariangel SANCHEZ, Charline DEMATTEO a Barbara LE BOT. Emissions of VOCs, SVOCs, and mold during the construction process: Contribution to indoor air quality and future occupants' exposure. *Indoor Air*. 2020, 30(4), 691-710. ISSN 0905-6947.
- [8] LIANG, Weihui, Chao WANG, Caiqing YANG a Xudong YANG. Volatile organic compounds in different interior construction stages of an apartment. *Building and Environment*. 2014, 81, 380-387. ISSN 03601323.
- [9] LIANG, Weihui. Volatile organic compounds, odor, and inhalation health risks during interior construction of a fully furnished residential unit in Nanjing, China. *Building and Environment*. 2020, 186. ISSN 03601323.

- [10] Vyhláška Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky. Zbierka zákonov č. 259/2008. 2008. O podrobnostiach o požiadavkách na vnútorné prostredie budov a o minimálnych požiadavkách na byty nižšieho štandardu a na ubytovacie zariadenia.
- [11] MOLHAVE, Lars. Volatile Organic Compounds, Indoor Air Quality and Health. *Indoor Air*. 1991, 1(4), 357-376. ISSN 0905-6947.
- [12] XU, Jing, Mieczyslaw SZYSZKOWICZ, Branka JOVIC, Sabit CAKMAK, Claire C. AUSTIN a Jiping ZHU. Estimation of indoor and outdoor ratios of selected volatile organic compounds in Canada. *Atmospheric Environment*. 2016, 141, 523-531. ISSN 13522310.
- [13] KOZIELSKA, Barbara, Anna MAINKA, Magdalena ŽAK, Dorota KALETA a Walter MUCHA. Indoor air quality in residential buildings in Upper Silesia, Poland. *Building and Environment*. 2020, 177. ISSN 03601323.

ZAMEZENÍ VZNIKU KONDENZACE NA OKENNÍM ZASKLENÍ A V PŘIPOJOVACÍ SPÁŘE

PREVENTION OF CONDENSATION ON THE WINDOW GLAZING AND ON THE CONNECTION JOINT

Petra Vorlíčková*¹, Miloš Kalousek¹

* vorlickova.p@fce.vutbr.cz

¹ Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika

Abstrakt

Cílem práce je studium průběhu teplot a nejnižší vnitřní povrchové teploty na přípojovací spáře okenního rámu a zasklení. Při standardních návrhových teplotách pro vnitřní a venkovní prostředí byly modelovány detaily okenního rámu v místě parapetu a ostění. V případě nevyhovujícího stavu je použit jako opravný prostředek pro zvýšení teploty nad rosný bod hliníková lišta tloušťky 0,6 mm, lepená na rám/parapet. Tento materiál slouží jako vodič tepla, přičemž je využito patentované technologie. Současně velmi nízká difúzní vodivost lišty vytvoří parozábranový efekt, tj. zamezí vniku vodní páry do oblasti přípojovací spáry, což dlouhodobě zajistí funkčnost detailu osazení okna ve stěnové konstrukci.

Klíčová slova

Nejnižší vnitřní povrchová teplota, povrchová kondenzace, rosný bod, přípojovací spára, okenní zasklení

Abstract

The aim of the work is to study the course of temperatures and the lowest internal surface temperature on the connection joints of the window frame and glazing. At standard design temperatures for indoor and outdoor environments, the details of the window frame at the location of the window sill and lining were modeled. In case of unsatisfactory condition, an aluminum strip 0.6 mm thick, glued to the frame/sill, is used as a remedy to increase the temperature above the dew point. This material serves as a heat conductor, using patented technology. At the same time, the very low diffusion conductivity of the bar creates a vapor barrier effect, ie it prevents the penetration of water vapor into the area of the connecting joint, which ensures the functionality of the window mounting detail in the wall structure in the long run.

Key words

Lowest internal surface temperature, surface condensation, dew point, connection joint, window glazing

1 ÚVOD

Okna představují 30–50 % ztrát přes obálku budovy [1]. Při analýze osazení oken ve stěně se díváme na 3 primární faktory: zachování kontinuity tepelné obálky (paralelní izotermy), nízké tepelné ztráty (snižovat hodnotu lineárního činitele prostupu tepla) a eliminace povrchové kondenzace (zvyšování nejnižší vnitřní povrchové teploty minimálně nad rosný bod). Vedle materiálového řešení a tepelného výkonu se samozřejmě přihlíží i k dalším vlastnostem, například stavitelnosti okna, přístupu denního osvětlení, solárním ziskům, vzduchotěsnosti a v neposlední řadě hraje důležitou roli estetické hledisko [2] [3].

V mnohých případech ovšem nelze vyhovět všem faktorům, které mohou snížit ztráty tepla obálkou budovy. Ať už se jedná o znemožnění výměny starších oken, absence vnějšího zateplení rámu nebo nekvalitně provedenou přípojovací spáru, je potřeba hledat řešení v méně invazivních formách zvýšení nevyhovující vnitřní povrchové teploty. Jako sanační prostředek nevyhovujícího stavu byla aplikována hliníková lišta na povrch okenního rámu a dále parapetu/ostění. Bylo přítom potřeba zachovat nejlepší poměr mezi estetickým hlediskem, tj. tvarem lišty a maximální plochou na styku s vnitřním prostředím tak, aby byl materiál vedením schopen přenést potřebné množství tepla do řešeného místa. Vedle vysoké tepelné vodivosti má hliník také vysoký faktor difúzního odporu, což vytváří vnitřní parotěsnící přepážku a chrání přípojovací spáru před vnikem vlhkosti. Modelování proběhlo pomocí metody konečných prvků v programech Ansys, Area a Meshgen Area.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED

Tento článek navazuje na předchozí příspěvek autorů v rámci konference JUNIORSTAV 2020 [4]. Uvádí podrobnější modely a přístupy k analýze průběhu teplot v místě přípojovací spáry okenního rámu a zasklení. Okna jsou hodnocena na zdivu bez vnějšího zateplení (zdivo CPP, tl. 600 mm) a především byla analyzována změna průběhu vlhkostí v konstrukci vlivem umístění lišty.

Povrchová kondenzace

Povrchová kondenzace vzniká v důsledku mnoha různých faktorů, nejčastěji se jedná o špatné tepelně-technické parametry použitých materiálů v konstrukci, příp. jejich nevhodným zabudováním do konstrukce anebo vysokou relativní vlhkostí vzduchu v interiéru.

Relativní vlhkost vzduchu je velmi důležitým pojmem, představující poměr mezi skutečným obsahem vodních par a maximálním obsahem vodních par ve vzduchu (%) [5]. Na rozdíl měrná vlhkost vzduchu popisuje přesné množství vodní páry obsažené ve vzduchu (g/kg) [6]. Při zahřívání vzduchu dochází ke snižování relativní vlhkosti vzduchu a zase naopak, měrná vlhkost přitom zůstává stejná.

Obecně platí, že teplejší vzduch je schopen pojmout více vlhkosti (vaření, sušení, koupání). Jakmile se teplý vzduch přiblíží k chladnějším povrchům, ochladí se a přebytečná vlhkost, kterou studený vzduch již není schopen pojmout, z kondenzuje na povrchu [7], [8]. Tento bod je nazýván teplotou rosného bodu a odpovídá danému stavu vzduchu. Například v h-x diagramu se nachází na křivce 100% vlhkosti, tzn. že je vzduch maximálně nasycen a již nepojme další vlhkost [6].

Výplně otvorů jsou i přes nejkvalitnější provedení stále jedním z nejslabších izolačních prvků v objektu [9]. Na vnitřní straně se jeví jako největší problém nedostatečné větrání a nepravidelné vytápění. Například v noci, kdy z důvodu útlumu topení přestává proudit teplý vzduch a v prostoru okna vzduch chladne. Vlhkost v takových případech kondenzuje na spodní části zasklení, kde se omezen přístup teplého proudícího vzduchu například záclonami nebo širokými parapety. Po z kondenzování vlhkosti na okně může být její následovně odpaření problematictější, protože ani po vyvětrání a zatopení nemusí být na zasklení dostatečná teplota pro odpaření vody v kapalném stavu [8].

V místě přípojovací spáry mezi zdivem a ráme vznikají největší tepelné mosty způsobené vlivem užívání objektu. Návrh a provedení osazení okna má velký vliv na tuto funkčnost. Záleží na materiálovém řešení konstrukce, typu montáže (zapuštěná, předsazená, lícová) a správném provedení přípojovací spáry. Ta musí být dilatační a měla by bránit kondenzaci vody a přístupu vzduchu tak, aby nedošlo k degradaci tepelné izolace v uložení rámu (PUR pěny) [9], [10]. Tohoto je docíleno okenními těsnícími páskami nebo komprimačními (kompresními) páskami [11].

3 METODIKA

Pro řešení úlohy vedení tepla je využívána metoda konečných prvků. Metoda je postavená na řešení základního elementu konečných rozměrů na rozdíl od pohledu klasické pružnosti – tj. nahrazení spojitějším prostředím diskretním modelem. Nespornou výhodou těchto numerických metod je řešení složitější geometrie [12], [13].

Detaily jsou hodnoceny z hlediska minimální normativní povrchové teploty pro stěny dle ČSN 73 0540-2, čl. 5.1 a okenní rámy dle ČSN 73 0540-2/Z1, čl. D.1 [14]. V případě nesplnění těchto podmínek je použita pro zvýšení teploty nad rosný bod hliníková lišta tloušťky 0,6 mm, tvarovaná a lepená v daných rozměrech a dle potřeb na rám/parapet. Tato lišta, jak již bylo uvedeno, slouží jako vodič, přičemž využívá patentované technologie. Z toho vyplývá, že z oblasti s vyšší teplotou (s vyšší kinetickou energií) přenáší v ustáleném stavu do chladnější oblasti (oblast s nižší kinetickou energií) právě tolik tepla, jaké si dokáže předat s okolním prostředím.

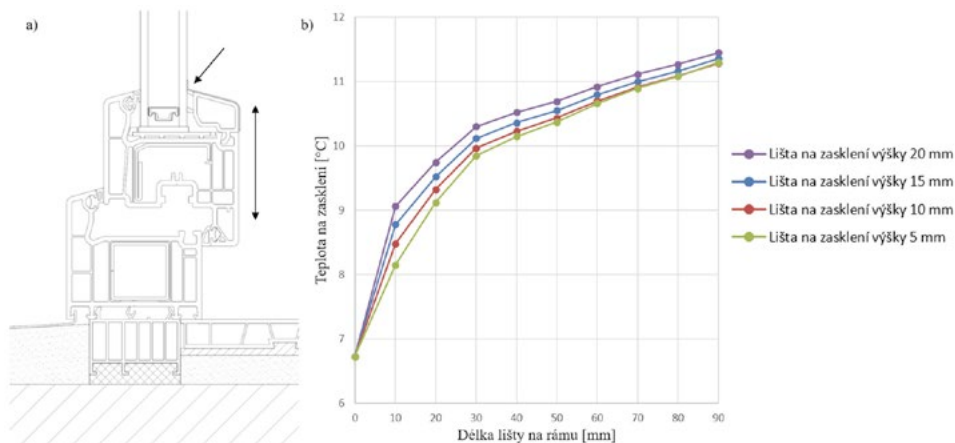
Druhým kritériem hodnocení je průběh vlhkostí a oblast kondenzace v přípojovací spáře okna. Všeobecně parotěsné fólie fungují na principu vytvoření nepropustné povrchové úpravy na výztužné mřížce, ty kvalitnější mají jako povrchový materiál použito hliníkovou fólii nebo hliníkové pokovení tak, aby bylo možné využití i odrazové funkce materiálu, proto byla lišta zkoumána v případě montáže na přípojovací spáře okna i z hlediska průběhu vlhkosti v konstrukci jako alternativa k používaným okenním interiérovým páskám.

Pro účely hodnocení schopnosti materiálů zabránit difuzi vodní páry skrze konstrukci je zavedena hodnota faktoru difuzního odporu a dále je sledována tloušťka hodnoceného materiálu. Se zvyšující se hodnotou ekvivalentní difuzní tloušťky se snižuje množství propuštěné vodní páry, ovšem pokud nebude materiál sloužící jako parotěsná vrstva na interiérové straně proveden spojitě a kvalitně, tj. těsné spojení a napojení, opracované prostory a jiné perforace, výsledná účinnost vrstvy je mnohem nižší [15].

4 VÝSLEDKY

Lišta na zasklení

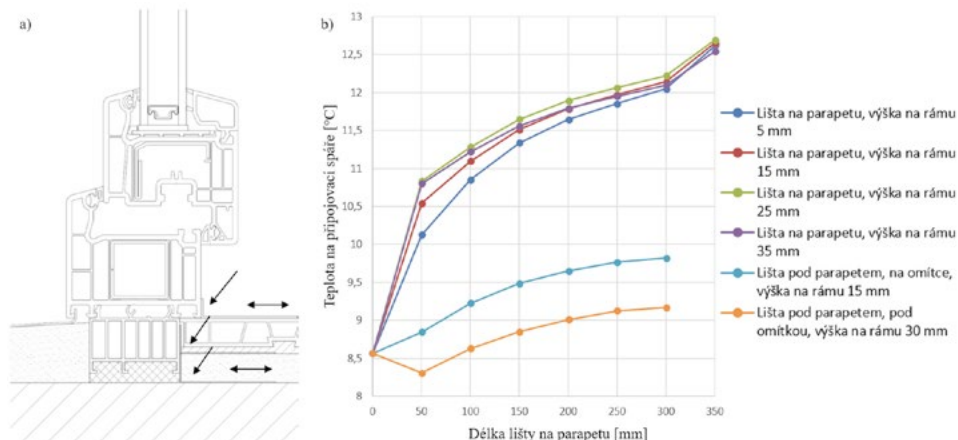
Nejnižší vnitřní povrchová teplota v místě styku okenního zasklení a rámu byla studována pro plastový okenní rám a izolační dvojsklo s teplým distančním rámečkem (viz. Obr. 1, a). V grafu níže (viz. Obr. 1, b) je vidět průběh teplot v případě aplikace hliníkové lišty různých délek na rám. Přitom jsou zde vytvořeny 4 varianty lišty, rozdělené dle výšky lepené části na zasklení, tj. 5, 10, 15 a 20 mm tak, aby lišta co nejméně stínila. Lepena je silikonovým lepidlem.



Obr. 1 Plastový okenní rám s hliníkovou lištou na okenním zasklení a) schéma b) graf závislosti teploty na zasklení na délce lišty na rámu.

Lišta na rámu v místě parapetu

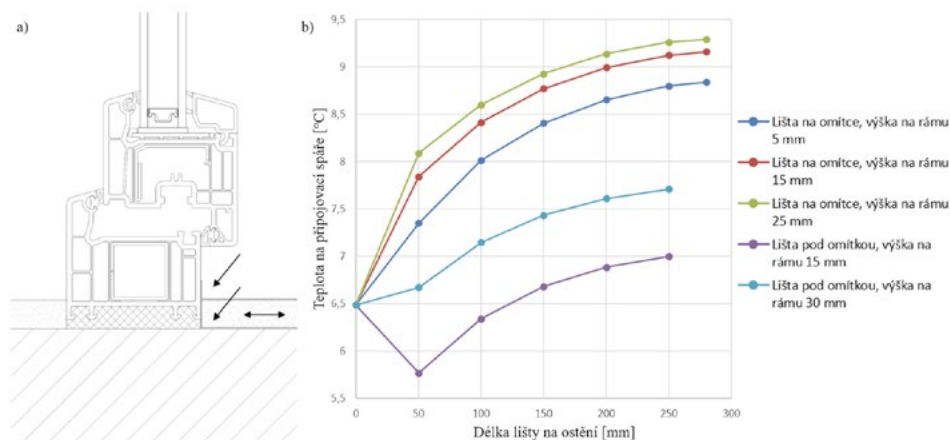
Hliníková lišta byla umístěna i v místě přípojovací spáry u parapetu (viz. Obr. 2), kde byl výchozí stav nevyhovující z hlediska nejnižší povrchové teploty. Aplikována byla jak přiznaně, tak i skrytě pod parapet nebo až na nosné zdivo – cihly plné pálené. Pro parapet bylo vytvořeno při různých vodorovných délkách 6 variant svislé výšky lišty na rámu okna (pro umístění na parapetu 5, 15, 25, 35 mm a poté pod parapetem 15 a 30 mm).



Obr. 2 Plastový okenní rám s hliníkovou lištou na a pod parapetem a) schéma b) závislost teploty na přípojovací spáře na délce lišty na parapetu.

Lišta na rámu v místě ostění

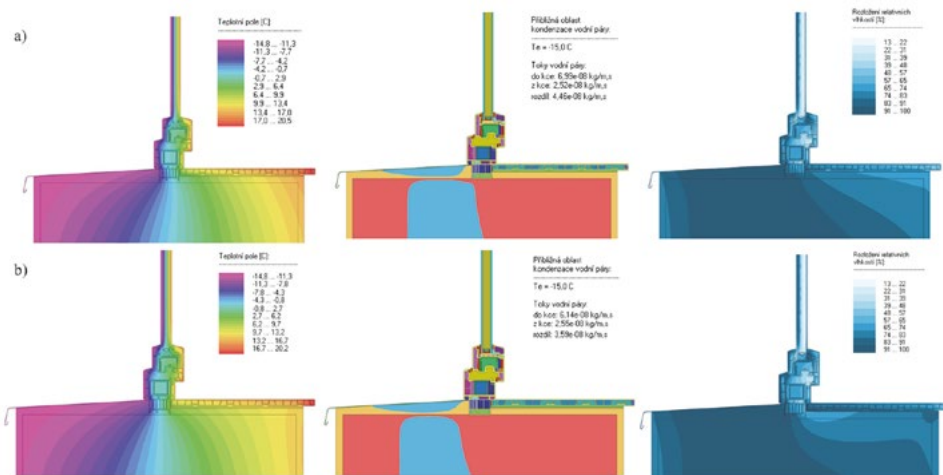
Analogicky k detailu parapetu byla lišta v různých délkách umístěna i v místě ostění na připojovací spáře (viz. Obr. 3). Opět zde bylo vytvořeno 5 variant výšky lišty na rámu okna, pro přiznanou aplikaci na omítce ve výškách 5, 15 a 25 mm a pro skrytou montáž pod omítkou v tloušťce omítky 15 mm a poté 30 mm.



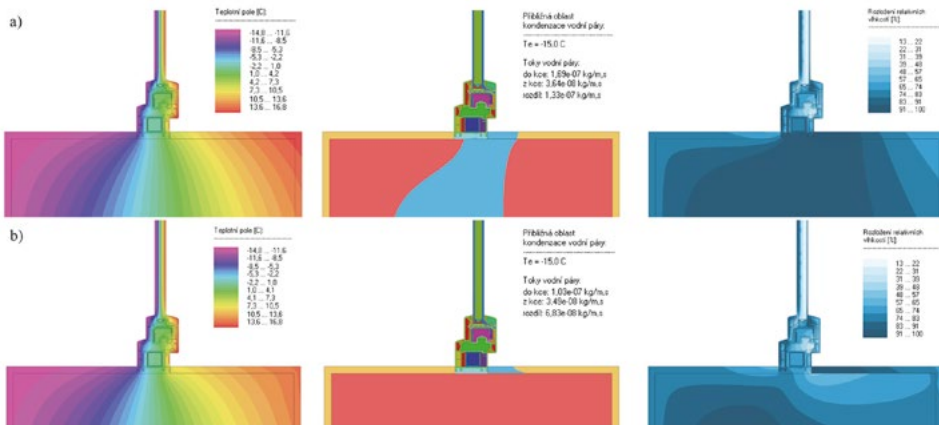
Obr. 3 Plastový okenní rám s hliníkovou lištou na a) pod omítkou ostění a) schéma b) závislost teploty na připojovací spáře na délce lišty na parapetu.

Průběhy teplot a vlhkostí v připojovací spáře

Pro stejný detail plastového okna s izolacím dvojsklem na zdivu z cihel plných pálených, tloušťky 600 mm, s připojovací spárou vyplněnou PUR pěnou, byly vytvořeny následující modely teplotního pole, oblasti kondenzace a relativních vlhkostí. Detail je vytvořen ve 2 variantách, v místě parapetu a ostění. Jsou srovnány varianty bez okenních pásek a s aplikovanou lištou pod parapet/omítku přes celou délku vnitřní části ostění.



Obr. 4 Plastový okenní rám v místě parapetu a) bez úpravy b) s Al lištou pod parapetem v celkové délce 305 mm.



Obr. 5 Plastový okenní rám v místě ostění a) bez úpravy b) s Al lištou pod omítkou v celkové délce 280 mm.

5 DISKUZE

Al lišta na zasklení

Jako první možnost umístění lišty byla volena připojovací spára zasklení k rámu okna. U parapetu v místě dolní části zasklení dochází velmi často ke kondenzaci vodní páry. I když pro okenní výrobek nemusí být tento jev degradující, je to minimálně uživatelsky nekomfortní závada, a navíc stékající kondenzát může poškodit připojovací spáru okna. Teplotní rozdíl v případě aplikace hliníkové lišty, tl. 0,6 mm, lepené silikonovým lepidlem, tl. 0,1 mm je při aplikaci nejkratší lišty, celkové délky 30 mm (délky na rámu 10 mm, tj. bez započítání výšky na zasklení), 2,3 °C – tato úprava postačuje na splnění normového požadavku pro okenní rámy – 8,25 °C [16]. Při aplikaci nejdelší lišty, tj. v rozvinuté délce 110 mm, už teploty dosahují zvýšení o 4,7 °C.

Al lišta na rámu v místě parapetu a ostění

Alternativně byla lišta umístěna jak přiznaně, tak skrytě na okenní rám v místě připojovací spáry. Pokud byla lišta přiznaná a vedena po parapetu, při nejkratší variantě hliníkové lišty, tl. 0,6 mm, tj. při rozvinuté délce 75 mm, došlo k nárůstu teploty o 2,3 °C. U nejdelší varianty lišty, tj. při celkové délce lišty 375 mm, byl zjištěn nárůst teploty o 4,1 °C. V tomto případě splnila požadavky stanovené normou pro stěnové konstrukce (min. teplota 11,58 °C) lišta o rozvinuté délce 175 mm – zvýšení teploty o 3 °C (délka na parapetu bez započtení výšky lišty na rámu – 150 mm). Pro případ skryté aplikace lišty nebyly pozorovány tak vysoké přírůstky, ovšem tato aplikace má výhody principu parotěsné přepážky, viz. dále.

V místě ostění se lišta chovala velmi obdobně jako u parapetu, ovšem nedosáhla tak výrazného zvýšení teploty. U nejkratší varianty lišty, celkové délky 75 mm, bylo zjištěno zvýšení teploty o 1,5 °C, v případě nejdelší lišty (celk. dl. 305 mm) o 2,8 °C. I tento přírůstek ovšem může zlepšit celkový stav ve spáře a zabránit degradaci PUR pěny.

Průběhy teplot a vlhkostí v připojovací spáře v místě parapetu a ostění

Hliníkovou lištu můžeme při hodnocení prostupu vodních par detailem díky vysokému faktoru difuzního odporu zařadit mezi parozábrany s vysokou parotěsností – $sd = 600$ m při tl. 0,6 mm [16]. Pro lištu není uvažována díky montáži lepením a vlastní celistvostí zhoršená účinnost, navíc při uvažování lišty přes celou tloušťku ostění není tak markantní problém vniku vodní páry v místě napojení na okolní konstrukce.

Z výsledků lze vyčíst, že na straně k interiéru byla vlhkost po aplikaci lišty v obou případech odkloněna. Pokud by byla uvažována exteriérová páska, výsledky by vyhověly ještě příznivěji, ovšem již toto řešení zajišťuje vytlačení 90% vlhkosti takřka ven z připojovací spáry, u ostění úplné vytlačení oblasti vlhkosti vyšší než 80 %.

S touto alternativou ochrany připojovací spáry okna lze uvažovat i v případě přiznané aplikace lišty na omítku/parapet, kde by došlo k výraznějšímu nárůstu teplot a tím dalším zlepšení v místě funkční spáry okna.

6 ZÁVĚR

Při posuzování detailů z hlediska tepelně-technického je hlavním úkolem eliminovat nebo úplně odstranit jakékoli tepelné mosty, nebo porušení vrstev plnicích funkcí parozábran. Pokud nelze přistoupit ke komplexnímu řešení nastalého problému (např. celistvé zateplení z exteriérové strany, vhodná montáž parotěsnicí vrstvy), dochází mnohdy k poruchám, vedoucím k poškození či úplnému zničení materiálů, například kondenzací.

Aplikací hliníkové lišty bylo prokázáno zvýšení teploty nad rosný bod v závislosti na délce (ploše) materiálu. Se zvýšením teploty souvisí i vlhkostní chování konstrukce. Lišta prokázala parozábranový efekt a díky tomu se ukázala být dobrou alternativou ke standardně užívaným interiérovým okenním páskám.

Použité zdroje

- [1] MALVONI, Maria, Cristina BAGLIVO, Paolo Maria CONGEDO a Domenico LAFORGIA. CFD modeling to evaluate the thermal performances of window frames in accordance with the ISO 10077. *Energy*. 2016, 111, 430-438. DOI: 10.1016/j.energy.2016.06.002. ISSN 03605442. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544216307745>
- [2] SIERRA, Francisco, Bill GETHING, Jiping BAI a Talal MAKSOUD. Impact of the position of the window in the reveal of a cavity wall on the heat loss and the internal surface temperature of the head of an opening with a steel lintel. *Energy and Buildings*. 2017, 142, 23-30. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.02.037. ISSN 03787788. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778816316383>
- [3] KAASALAINEN, Tapio, Antti MÄKINEN, Taru LEHTINEN, Malin MOISIO a Juha VINHA. Architectural window design and energy efficiency: Impacts on heating, cooling and lighting needs in Finnish climates. *Journal of Building Engineering*. 2020, 27. DOI: 10.1016/j.jobee.2019.100996. ISSN 23527102. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710219303870>
- [4] VORLÍČKOVÁ, Petra a Miloš KALOUSEK. Možnosti zvýšení povrchové teploty nad rosný bod na přípojovací spáře a zasklení okna. In: JUNIORSTAV 2020: 22. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2020, s. 918-924. ISBN 978-80-86433-73-8.
- [5] PAPRANEC, Michal a David BEČKOVSKÝ. Faktory ovlivňující vnitřní povrchovou teplotu a kondenzaci na povrchu konstrukcí – Díl 1. TZB-info [online]. 2012 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/vlhkost-a-kondenzace-v-konstrukcich/9134-faktory-ovlivnujici-vnitri-povrchovou-teplotu-a-kondenzaci-na-povrchu-konstrukci-dil-1>
- [6] SCHWARZER, Jan. Teorie vlhkého vzduchu (I): Úvod a vyjádření vlhkosti vzduchu. TZB-info [online]. 29.5.2006 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/teorie-a-vypocty-vetrani-klimatizace/3323-teorie-vlhkeho-vzduchu-i>
- [7] SOLAŘ, Jaroslav. Řešení problematiky povrchové kondenzace vodní páry. TZB-info [online]. 2010 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/6541-reseni-problematiky-povrchove-kondenzace-vodni-pary>
- [8] HORÁK, Vladimír. Kondenzace vlhkosti na oknech [online]. In: . Kroměříž, 2011 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <http://www.portastyl.cz/soubor-kondenzace-vlhkosti-na-oknech-49-.pdf>
- [9] MÚČKA, Martin. Vady a poruchy stavebních otvorových výplní, 1. část. TZB-info [online]. 2014 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/fasadni-okna/11600-vady-a-poruchy-stavebnich-otvorovych-vyplni>
- [10] Časté chyby a závady plastových oken. Ekologické bydlení.eu [online]. 2017 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <http://www.ekobydleni.eu/domy/caste-chyby-a-zavady-plastovych-oken>
- [11] ŠUBRT, Roman. Provedení přípojovací spáry. TZB-info [online]. [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/okna-dvere/293-provedeni-pripojovaci-spary>
- [12] VRBKA, Martin a Michal VAVERKA. Metoda konečných prvků: 1. přednáška – Úvod [online]. In: . [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1_mkp.pdf
- [13] Přednáška 1: 1 Metoda konečných prvků (MKP). In: <http://mech.fsv.cvut.cz/> [online]. [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <http://mech.fsv.cvut.cz/~zemanj/teaching/mk10/prednasky/prednaska1.pdf>
- [14] ČSN 73 0540-2:2011 Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. Z1. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [15] FAKTOR DIFUZNÍHO ODPORU A EKVIVALENTNÍ DIFUZNÍ TLOUŠTKA. In: IZOLACE-INFO [online]. 3. 1. 2018 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://www.izolace-info.cz/aktuality/21467-faktor-difuzniho-odporu-a-ekvivalentni-difuzni-tloustka-a.html#.X76gi2hKguU>
- [16] RYPL, Jan. Problematika a hrůzy při provádění parozábran v zateplených šikmých střeších. TZB-info [online]. 3.7.2006 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/strechy/3397-problematika-a-hruzy-pri-provadeni-parozabran-v-zateplenych-sikmych-strechach>

VYUŽITÍ ODPADNÍCH TEPELNĚ-IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ PRO VÝPLŇOVÉ HMOTY DO KERAMICKÝCH DUTINOVÝCH TVAROVEK

THE USE OF WASTE THERMAL INSULATION MATERIALS FOR FILLING MATERIALS IN CERAMIC HOLLOW BRICKS

David Průša^{*1}, Stanislav Šťastník¹, Karel Šuhajda¹

^{*}David.Prusa@vutbr.cz

¹Fakulta stavební VUT v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Předložená práce se zabývá vlastnostmi a možnostmi recyklace tepelně-izolačních materiálů např. pěnového polystyrenu a minerální vlny, nejen z nemovitostí po demolici, ale i z materiálů, které zůstaly na staveništi po ukončení výstavby jako odpad. Nově vyvinutá hmota se zkouší jako plnivo do velmi lehkých betonů za účelem vyplnění dutin keramických tvarovek, jako plnivo do samonivelačních betonů i pro výrobu akustických desek.

Klíčová slova

Tepelný odpor, keramická tvarovka, recyklace, polystyrén, minerální vlna

Abstract

This task deals with the properties and the possibility of recycling of thermal insulation materials such as polystyrene and mineral wool, not only from buildings after demolition but also from discarded materials left over after the construction of new buildings. This newly developed material is being tested as a filler for ultra-lightweight concrete where it fills the cavities of ceramic hollow bricks, as a filler for self-compacting concrete (SCC) and for the production of acoustic facing.

Key words

Thermal resistance, ceramic hollow brick, recycling, polystyrene, mineral wool

1 ÚVOD

Výrobci dutinových dílců pro stavebnictví, zejména pak keramických dutinových tvarovek, mají povinnost deklarovat nejen mechanické vlastnosti výsledného výrobku, ale i další užité vlastnosti, zejména hodnoty tepelně technických veličin, např. hodnotu tepelného odporu, součinitele prostupu tepla a také součinitele tepelné vodivosti. Z hlediska zlepšení tepelně technických vlastností keramických tvarovek bylo prokázáno, že je účelné dutiny těchto dílců vyplnit vhodným plnivem. Dosáhne se tak nejen zlepšení zmíněného tepelného odporu, ale zároveň omezíme vliv tepelných mostů, které by jinak mohly vzniknout zásahem do skladby konstrukce.

V současné době se využívají na výplně dutin různé tepelně izolační materiály, nicméně je snahou nahrazovat je různými odpadními materiály. To má nesporný vliv nejen na výslednou cenu dílce, ale i na jeho "ekologickou stopu". Tím se rozumí právě využití odpadního polystyrenu a odpadní minerální vlny, která by se jinak musela skladovat. Právě minerální vlna vytváří z ekologického hlediska problém, jelikož spadá do kategorie nebezpečných odpadů a jako odpadní materiál se tudíž musí skladovat na skládkách pro nebezpečný odpad, jehož cena za skladování je poměrně vysoká. Nevyužívá se zde zpracovat minerální vlnu ani pěnový polystyrén na palivo z důvodu přítomnosti inhibitorů hoření, nýbrž způsobem znovuzhodnocení a další průmyslové recyklace.

Pěnový polystyrén je obecně heterogenní materiál sestávající z jednotlivých vzduchových dutin v polymerové matici, jehož hlavní vlastností je velmi nízká hodnota objemové hmotnosti; je také stabilní, hydrofobní, trvanlivý a vykazuje kvalitní adhezi s cementovou maticí. Recyklovaný pěnový polystyrén je rozdrčen na malé kusy s drsným povrchem, což oproti hladkému povrchu běžných granulí umožňuje vznik pevnější tranzitní zóny mezi plnivem a pojivem [1]. Mimo to je možné také prodloužit trvanlivost výsledného kompozitu. Ferrándiz-Mas a García-Alcocecel [2] během svého výzkumu zjistili, že použití recyklovaného pěnového polystyrenu snížílo

kapilární absorpci a díky schopnosti polystyrénu lépe absorbovat krystalizační tlaky zlepšilo celkovou mrazuvzdornost kompozitu.

Minerální vlna naproti tomu je složena z čedičových vláken opatřených silikonovým olejem. To má za následek její nehořlavost a hydrofobní vlastnosti. Prozatím nebyl v České republice proveden dostatečný výzkum využití odpadní minerální vlny a fakticky neexistuje technologie, která by tento materiál vhodně využívala.

V tomto příspěvku je navrženo a porovnáno několik receptur záměsí, které se liší množstvím tepelně izolačních recyklovaných materiálů, dávkou pojiva a přísad. Dále jsou studovány tepelné, mechanické a fyzikální vlastnosti výsledných směsí [4], [5].

2 MATERIÁL A METODIKA

Složení jednotlivých záměsí je uvedeno v Tab. 1. Pro jejich přípravu bylo využito silikátové pojivo – cement – CEM I 42,5 R, β -sádra a α -sádra. Jako plnivo byl využit pěnový polystyrén s obchodním názvem Styrobal drcený. Jedná se o polystyrénové granule kulovitého tvaru, přičemž byly vytríděné frakce 0–12 mm a 0–4 mm. Dále byla využita rozvlákněná minerální vlna z fasádních tepelně izolačních desek. Návrh směsí se řídil požadavkem dosažení maximální pevnosti v tlaku při zachování nízké objemové hmotnosti. Z každé záměsí byly vyformovány vzorky, na kterých byly zkoumány zmíněné vlastnosti. Snahou bylo optimalizovat vstupní suroviny, zejména zvolit minimální dávku pojiva při zachování dostatečné manipulační pevnosti, dosažení potřebné konzistence čerstvé směsi a nízké objemové hmotnosti. Pro zhutnění směsí bylo využito laboratorního vibračního stolku [4] [5].

Tab. 1 Přehled složení tepelně izolačních směsí [4], [5].

Složka	Jednotka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CEM I 42,5 R	kg·m ⁻³	625	625	556	526	387	-	-	526	-	-
EPS 0–4	kg·m ⁻³	62,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EPS 0–12	kg·m ⁻³	-	62,5	111,1	157,9	64,5	62,5	100	-	167	125
Záměsová voda	kg·m ⁻³	313	313	333	316	280	470	405	316	333	375
Minerální vlna	kg·m ⁻³	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-
β-sádra	kg·m ⁻³	-	-	-	-	-	470	462	-	-	-
α-sádra	kg·m ⁻³	-	-	-	-	-	-	-	-	500	500
Vodní součinitel	-	0,5	0,5	0,6	0,6	0,72	1	0,88	0,6	0,67	0,75

3 VÝSLEDKY

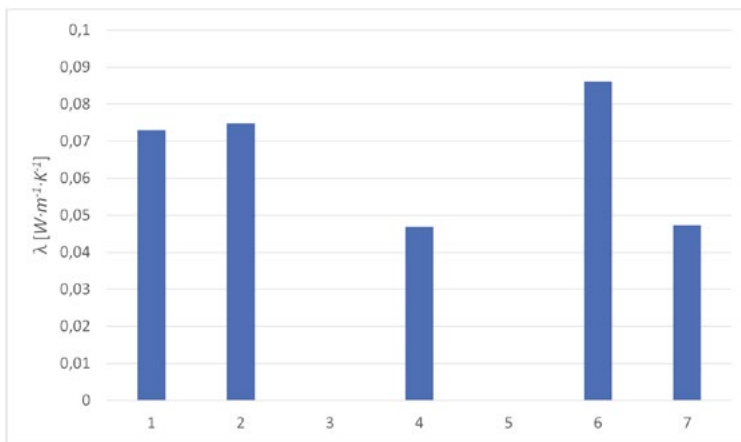
Tab. 2 udává výsledky naměřených veličin. U vzorků 1 a 2 docházelo k segregaci cementového pojiva a vzorky 3 a 5 byly mechanicky poškozeny. U vzorku 5 tímto bylo zjištěno nedostačující množství cementového pojiva. Vzorky 1 a 2 měly stejné složení, avšak lišily se pouze ve vybrané frakci EPS. Výsledný rozdíl hodnot je nepatrný, a tedy velikost frakce nemá vliv na výslednou hodnotu součinitele tepelné vodivosti. Vzorek 4 vykazuje nejnižší možné množství cementového pojiva, kdy je ještě zachována dostatečná mechanická stabilita vzorků. Tento vzorek byl porovnán se směsí, kde byla dále využita recyklovaná minerální vlna v dávce 5 kg na m³. Jelikož prozatím není v České republice dostupná technologie zpracování odpadní minerální vlny, byla zpracována manuálně. Z výsledků vyplývá, že zvolené množství nemá vliv na výsledný součinitel tepelné vodivosti a je zde možnost vytvořit vzorky, kde se použije více odpadní minerální vlny. To bude předmětem dalšího zkoumání.

Dále byl stanoven součinitel tepelné vodivosti vzorků, kde byly jako pojivo využity β -sádra a α -sádra. Vzorky vykazují vyšší manipulační pevnost než vzorky směsí, kde bylo využito cementové pojivo při zachování takřka stejné hodnoty součinitele tepelné vodivosti. Při výběru vhodného pojiva do výplňových směsí tedy bude rozhodovat zejména jejich cena a množství spotřebovaného materiálu, přičemž je zřejmé, že je mnohem výhodnější využít právě cementové pojivo.

Také byla ověřena dostatečná přídržnost vybraných vzorků v keramické dutinové tvarovce [4], [5].

Tab. 2 Přehled hodnot objemové hmotnosti jednotlivých směsí a součinitele tepelné vodivosti po 7. dnech od odformování zkušebních vzorků [3], [4], [5].

	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
1	280	0,0729
2	280	0,0740
3	-	-
4	200	0,0469
5	-	-
6	240	0,0862
7	190	0,0473
8	270	0,0473
9	210	0,0482
10	200	0,0479



Obr. 1 Grafický přehled hodnot součinitelů tepelné vodivosti jednotlivých záměsí [4], [5].



Obr. 2 Fotografie vybraných vzorků záměsí na keramickém substrátu [4], [5].

Zjištění tepelného odporu keramických dutinových tvarovek

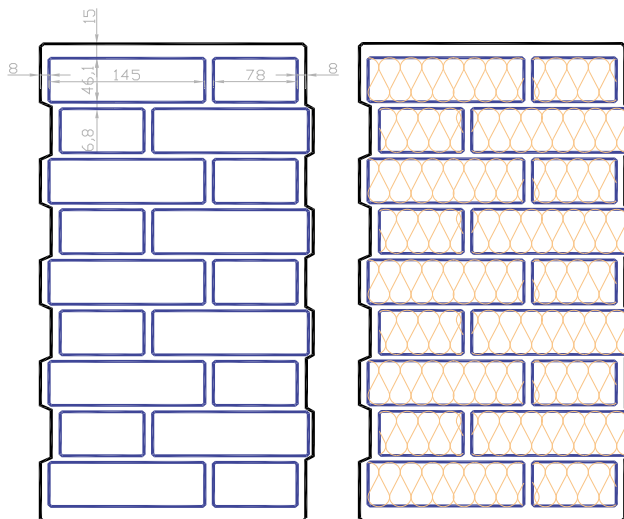
Pro měření fyzikálních vlastností keramických tvarovek se používá postup, který je založený na metodě normy EN 1745: 2012. Kvůli ekonomickým důvodům není vhodným způsobem výzkumu sestavení testovací stěny z navržených tvarovek, ale na druhé straně se nemusí použít pouze tabulkových hodnot a zjednodušených výpočtových postupů, které mohou vést k přesnosti výpočtů. Lze využít principu optimalizace keramických tvarovek, které využívají laboratorního měření a numerického modelování podle Fourierovy rovnice vedení tepla. Je to čtyřfázový algoritmus, který zahrnuje:

- identifikaci vlastností materiálu pomocí laboratorních měření,
- návrh CAD geometrie zdíva,
- termodynamickou analýzu šíření tepla simulací navrženého zdíva z keramických tvarovek,
- optimalizaci geometrie a plniva pomocí výsledků získaných z analýzy simulace.

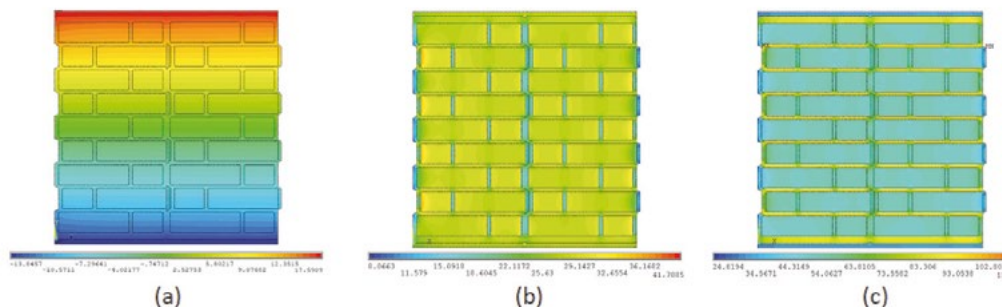
Použitím tohoto algoritmu, jehož cílem je vytvořit optimalizovaný zděný tepelně izolační blok, lze snížit náklady na materiál ve výrobě. Po ověření návrhu si výrobce může vybrat z navržených keramických tvarovek podle výrobních nákladů, výsledného tepelného odporu nebo i komerčního hodnocení.

Tepelná vodivost je v laboratorních podmínkách měřitelná, pro účely tohoto výzkumu byla použita pálená keramika KM Beta z České republiky. Naměřená hodnota tepelné vodivosti vypálené keramického střepu byla $\lambda_{\text{keramika},10,\text{suché}} = 0,325 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Měřené vlastnosti dutinových výplňových materiálů byly pro výplň stanoveny na základě odpadní tepelné izolace $\lambda_{\text{odpad},10,\text{suché}} = 0,047 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ s objemovou hmotností $90 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\lambda_{\text{MW},10,\text{suché}} = 0,035 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ s objemovou hmotností $60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\lambda_{\text{PUR},10,\text{suché}} = 0,026 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ s objemovou hmotností $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $\lambda_{\text{aerogel},10,\text{suché}} = 0,012 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ s objemovou hmotností $120 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Z hlediska simulace přenosu tepla je ustálený teplotní stav podle Fourierovy rovnice dostatečným prostředkem pro modelování přenosu tepla pomocí vyplněných keramických tvarovek. Pokud některé dutiny obsahují vzduch, musí simulace zahrnovat také přenos tepla dutinami konvekcí a radiací mezi povrchy. Pro všechna hodnocení byl použit výpočetní nástroj ANSYS; Obr. 3 zobrazuje typické výpočetní výsledky [6].



Obr. 3 Schéma keramické tvarovky využité pro modelování [6].



Obr. 4 (a) Rozložení teplot jako výsledek numerického modelování v prostředí programu ANSYS, (b) rozložení tepelných toků a (c) teplotní gradient na řezu keramické dutinové tvarovky [6].

Výsledky modelování

Podle výsledného tepelného odporu keramických tvarovek lze zjistit, že nižšího tepelného odporu se dosahuje použitím keramických tvarovek vyplněných vzduchem. Jakákoli tepelně izolační hmota významně zvyšuje tepelný odpor, jak je patrné z hodnot v Tab. 3. Tvarovky obsahující výplň aerogelu mají podle očekávání nejnižší hodnotu součinitele prostupu tepla.

Tab. 3 Přehled tepelných odporů keramických dutinových tvarovek s využitím výplňové hmoty [6].

Výplňová hmota	Vypočítaná hodnota tepelného odporu tvarovky R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$] s výplní
Vzduch	1,05
Výplň z odpadních produktů	6,04
Minerální vlna	7,09
Polyuretanová pěna	8,17
Aerogel	10,07

Použití výplňové hmoty na bázi odpadních tepelných izolantů vykazuje příznivé hodnoty tepelného odporu. PUR pěna významně zvyšuje tepelnou izolační schopnost tvarovky a nabízí lepší výsledky než výplně z minerální vlny a také než výplně z odpadních produktů [6].

4 DISKUZE

Z výsledků zjištěných hodnot tepelných odporů můžeme potvrdit data, která poskytuje dodavatel dutinových tvarovek plněných minerální vlnou. Odchytky naměřených hodnot mohou být způsobené numerickým modelováním a hodnotami součinitele tepelné vodivosti materiálů, které byly změřeny. Rozdíl mezi hodnotami tepelných odporů dutinových tvarovek vyplněných minerální vlnou a odpadním materiálem je přibližně 15 %. Při takto značném rozdílu hodnot tepelných odporů vyvstává otázka možnosti dalšího výzkumu pro zajištění snížení hodnoty součinitele tepelné vodivosti a tím zvýšení hodnoty tepelného odporu tvarovky za využití výplně z odpadních produktů. Pro zajištění stejné hodnoty tepelného odporu tvarovky s využitím odpadních produktů a tvarovky s využitím minerální vlny je potřeba zajistit součinitel tepelné vodivosti výplně z odpadních produktů pod hodnotu $0,04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. To se může zajistit změnou objemu pojivové složky ve směsi a nebo využitím jiného pojiva.

5 ZÁVĚR

V této práci bylo provedeno porovnání několika typů výplňových směsí s obsahem recyklovaného pěnového polystyrénu a odpadní minerální vlny jako plniva. U studovaných materiálů byla nejprve určena objemová hmotnost a hodnota součinitele tepelné vodivosti. Směsi byly navrženy s ohledem na zachování manipulační pevnosti a nízkých hodnot objemové hmotnosti i hodnoty součinitele tepelné vodivosti. Podle výsledků bylo zjištěno minimální množství pojiva, porovnání vlastností směsí s různou frakcí recyklovaného polystyrénu a porovnání vlastností při využití dvou různých pojiv. Bylo zjištěno, že zde není znatelný rozdíl hodnoty součinitele tepelné vodivosti záměsí, kde byly použity rozdílné frakce pěnového polystyrénu. Tento poznatek dává dílčí informaci o potřebě zpracování odpadního polystyrénu. Cementové pojivo se jeví jako vhodnější materiál pro svou nižší cenu. Nicméně výhodou sádrového pojiva je rychlý náběh zpevňování struktury oproti cementovému pojivu, což může limitovat potřebnou dobu pro skladování k získání minimální manipulační pevnosti. Oproti konvenčně využívaným tepelně izolačním materiálům tvarovek je výhodou příznivá adheze výplňové hmoty k tvarovce, nevýhodou pak nutnost použití směsí o vyšší objemové hmotnosti. S tím je ovšem vázán vyšší hodnota součinitele tepelné vodivosti i objemová tepelná kapacita.

V závěrečné části práci bylo numericky modelováno šíření tepla tvarovkou jako heterogenním prostředím, odvozen výsledný tepelný odpor keramické tvarovky s využitím různých typů výplní, přičemž jsme dosáhli příznivých výsledků a ověřili i další údaje, které poskytují výrobci o výrobcích. Přesto se v této oblasti stále nachází prostor pro další výzkum, zejména využití odpadní minerální vlny a vytvoření vhodné technologie pro její recyklaci. Další možné využití se jeví v oblasti uplatnění ve vývoji ultralehkého samozhutnitelného betonu na bázi odpadních recyklačních hmot a také například ve vývoji desky pro využití ve stavebnictví s vysokou hodnotou činitele zvukové pohltivosti pro zlepšení srozumitelnosti přednesu v místnosti. V současné době se zaměřujeme na optimalizaci skladby vstupních surovin a další snížení hodnoty součinitele tepelné vodivosti s cílem dosažení vysokého výsledného tepelného odporu keramických dutinových tvarovek pro zdění.

Poděkování

Tento výzkum byl částečně podpořen Technologickou agenturou České republiky č. TH04030425 a projektem specifického výzkumu Vysokého učení technického v Brně č. FAST-J-20-6356.

Použité zdroje

- [1] GRZESZCZYK, S. a U. BRUDKIEWICZ. Styrol-Asche-Beton als Baustoff. *Environmental Engineering: Scientific Papers*. Opole, Poland: Opole University of Technology, 2006, **319**(5), 215-223. ISSN 1428-8540.
- [2] FERRÁNDIZ-MAS, V. a E. GARCÍA-ALCOCEL. Durability of expanded polystyrene mortars. *Construction and Building Materials*. 2013, **46**, 175-182. ISSN 0950-0618.
- [3] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [4] PRUSA, D., S. STASTNIK, S., K. SUHAJDA, J. POLASEK a T. ZAJDLIK. Recycling of Thermal Insulation Materials. *AIP Conference Proceedings*. [přijátý k publikování]. 2020. ISSN 1551-7616.
- [5] PRUSA, D., S. STASTNIK, S., K. SUHAJDA a J. POLASEK. Recyklace tepelně izolačních materiálů ve stavebním odvětví. In: *Recycling 2020*. [přijátý k publikování]. 2020. ISBN 978-80-214-5728-7.
- [6] STASTNIK, S., D. PRUSA a K. SUHAJDA. Optimization of geometric arrangement of filled ceramic blocks. *AIP Conference Proceedings* [přijátý k publikování]. 2020. ISSN 1551-7616.

STANOVENÍ ZÁVISLOSTI SOUČINITELE TLAKOVÝCH ZTRÁT NA GEOMETRII VZDUCHOTECHNICKÝCH KOLEN

DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF THE PRESSURE LOSS COEFFICIENT ON THE VENTILATION ELBOWS GEOMETRY

Michal Nováček^{*,1}

*michal.novacek93@seznam.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky, Veveří 95, 60200 Brno

Abstrakt

Analytické stanovení závislosti součinitele tlakových ztrát na geometrii potrubí má význam zejména pro automatizaci návrhu potrubí. Při vytváření potrubní větve jakožto informačního modelu budovy vznikají geometrické parametry jednotlivých tvarovek a přímých kusů potrubí. S využitím doplňkových nástrojů lze využít vymodelovanou geometrii a aplikovat na ni analytické rovnice závislosti tlakových ztrát a automatizovat tak proces návrhu potrubní větve. Cílem tohoto článku je pak stanovení analytického vyjádření součinitele tlakových ztrát samostatných kolen a dvojic kolen kruhového průřezu laboratorním měřením.

Klíčová slova

Součinitel tlakové ztráty, vzduchotechnické potrubí, tvarovka, BIM, geometrické parametry

Abstract

Analytical determination of the dependence of the pressure loss coefficient on the duct geometry is important especially for the automation of the ductwork design. When creating a ductwork as a building information model, the geometric parameters of individual duct fittings and straight ducts are created. Utilizing additional tools, it is possible to use the modeled geometry and apply analytical pressure loss equations to it and thus automate the process of ductwork design. The aim of the paper is to determine the analytical expression of the round cross-section single elbow and pair of elbows pressure loss coefficient by laboratory experiment.

Key words

Pressure loss coefficient, ductwork, fitting, BIM, geometric parameters

1 ÚVOD

Tlakové ztráty na vzduchotechnickém potrubí vychází z geometrických vlastností potrubí a fyzikálních vlastností proudícího vzduchu. Tyto parametry vstupují do základních fyzikálních vztahů pro výpočet tlakové ztráty ať už přímých kusů potrubí nebo vzduchotechnických tvarovek (oblouky, přechody, redukce, T-kusy). Výpočet tlakové ztráty pak spočívá v součtu veškerých tlakových ztrát jednotlivých prvků sestavy. Tato hodnota je klíčová pro návrh optimálního ventilátoru [1].

Ventilátor je značným konzumentem elektrické energie v objektu. Jeho podíl na spotřebě může být až do výše pětiny celkových nákladů na provoz budovy [1]. Proto je jeho optimální návrh klíčový pro udržitelné stavitelství. Zbytečné předimenzování pak vede k nadměrným nákladům provozní fáze budovy, jejíž náklady jsou nejvyšší z celého životního cyklu budovy [2]. Přitom s pokročilým využitím informačního modelu budovy lze dosahovat přesnějších návrhů ventilátorů díky možnosti implementace netriviálních vztahů do výpočtového modelu. Výhodou BIM pro tuto analýzu je základní vymodelovaná geometrie potrubí, sloužící jako podklad projektové dokumentaci.

Vztahy pro výpočet tlakových ztrát tvarovek jsou netriviální a často jsou uvedeny ve vyčíslené tabelární podobě. Pro využití v BIM nástrojích je vhodnější tabelární hodnoty nahradit matematickými vztahy, popisujícími závislosti součinitelů tlakových ztrát na geometrických parametrech tvarovek. Tyto vztahy však nejsou příliš rozšířené, neboť jejich užití není tolik opodstatněno jako užití vyčíslených hodnot pro manuální

výpočty. Tento článek přináší právě vztahy pro výpočet součinitelů tlakových ztrát na kolenech kruhového průřezu při různých vnitřních průměrech potrubí a různých poloměrů zaoblení osy kolene a navazuje na předchozí výzkum hranatých kolen [3]. Práce také zohledňuje tlakové ztráty dvou kolen za sebou jdoucích s různými délkami mezilehlých kusů.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED/POPIS SOUČASNÉHO STAVU

Tlakové ztráty vznikají třením jednotlivých vrstev vzduchu o stěny potrubí. V případě změn směru proudnic vzduchu jsou tlakové ztráty ještě vyšší, neboť dochází k odtržení jednotlivých proudnic od proudového pole [1]. Proto tlakové ztráty rozdělujeme na tlakové ztráty místní pro tvarovky, kde dochází ke změnám směru proudění a tlakové ztráty po délce přímých kusů potrubí. Tlakové ztráty po délce potrubí jsou u potrubí s relativně hladkým povrchem o poznání nižší než místní tlakové ztráty. Je zřejmé, že čím členitější je geometrie tvarovky, tím je vyšší její tlaková ztráta.

Stanovit tlakové ztráty je možné s využitím metod CFD analýzy. Tato metoda je však softwarově i hardwarově náročná, pokud chceme dosáhnout určité přesnosti. Její význam při návrhu vzduchotechnické větve je zejména u členitých tvarovek a armatur, které nejsou geometricky typizované.

Zjištění tlakové ztráty u přímých kusů potrubí spočívá ve výpočtu se vstupujícími geometrickými parametry potrubí (délka potrubí, průměr) a jeho povrchové relativní drsnosti [4].

Pro případy hojně se vyskytujících tvarovek (oblouky, redukce, T-kus) se často využívá tabelárních hodnot součinitelů tlakových ztrát, jenž závisí na typu tvarovky a jejich základních geometrických parametrech. Tyto hodnoty mohou být vytvořeny pomocí zmíněné CFD metody či laboratorním měřením. Součinitel v součinu s dynamickým tlakem pak tvoří tlakovou ztrátu tvarovky.

Implementací tabelárních hodnot přímo do BIM návrhového softwaru je možné automatizovat výpočet tlakových ztrát. Možností je také import informačního modelu nebo jeho geometrických a parametrických vlastností (například formátem IFC) do samostatného výpočtového softwaru. V obou případech je celkový výpočet závislý na zdroji součinitelů tlakových ztrát zohledňujícím geometrické parametry tvarovek. Zdrojem nejvíce odpovídajícím realitě je pak set laboratorně naměřených hodnot na reálném potrubí. Reálně naměřené hodnoty pak mohou být zpracovány do tabelární podoby nebo do podoby matematického vztahu. Právě stanovení hodnot součinitelů tlakových ztrát na reálném potrubí a jejich zapracování do matematických vztahů a následné použití v návrhovém softwaru informačního modelu budovy je předmětem tohoto článku.

3 METODIKA

Místní tlaková ztráta tvarovky je vyjádřena jako podíl dynamického tlaku a součinitele tlakové ztráty příslušné tvarovky

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (1)$$

kde ζ je součinitel místních tlakových ztrát příslušné tvarovky (často se využívá tabelárních hodnot, které závisí na typu tvarovky a její geometrii), ρ je objemová hmotnost vzduchu (v případě vzduchotechniky) a v je střední rychlost proudění vzduchu v potrubí.

Klíčovou neznámou ve vztahu (1) je součinitel místních tlakových ztrát. Ten lze nalézt v řadě odborných publikací [5], [6], [7]. Zároveň se v těchto publikacích hodnoty mezi sebou liší. Důvodem těchto rozdílů může být typ získání dat (CFD analýza nebo laboratorní měření) nebo třeba zvolený regresní model pro stanovení závislosti a následné vyčíslení těchto závislostí do tabulky.

Součinitele lze získat pomocí CFD analýzy nebo laboratorním měřením tvarovek. Při laboratorním měření se vychází ze změřeného rozdílu tlaků před a za tvarovkou a následného dopočítání součinitele pro danou střední rychlost proudění.

$$\zeta = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot v^2}, \quad (2)$$

kde Δp je změřený rozdíl statických tlaků na začátku a na konci tvarovky. Tento tlak je tlak statický, což vychází z Bernoulliho rovnice za předpokladu absolutní těsnosti celé soustavy a nulového výškového rozdílu v rámci měřeného úseku.

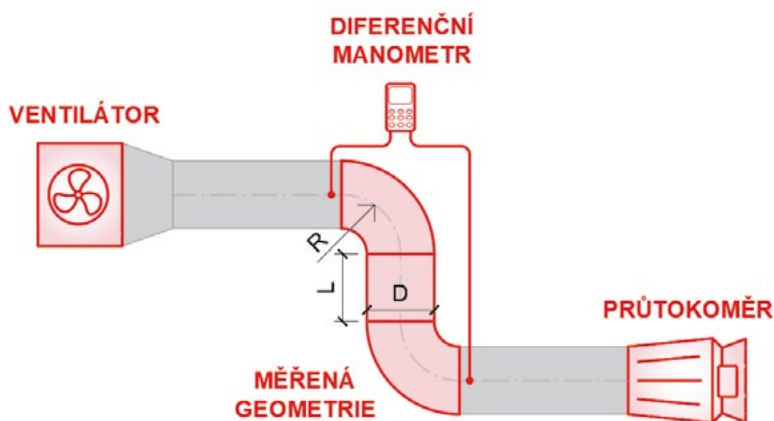
V rámci výzkumu byla měřena kolena kruhového průřezu z pozinkovaného plechu tl. 0,7 mm. Z potrubí byly sestaveny potrubní větve složené z uklidňovacích kusů před a za měřeným úsekem pro uklidnění proudění a eliminaci vlivu turbulence na výsledku. Uklidňovací kusy jsou délky 1,0 m. Dále byly na sestavě zabudovány

samostatná kolena o úhlech 45° a 90° . Další variantou byly dvě kolena za sebou jdoucí, opačných smyslů, o úhlech 45° a 90° . Mezi jednotlivými koleny byly zvoleny 3 typy délek mezilehlých kusů. Tyto všechny kombinace byly analyzovány pro 3 rozličné průměry potrubí. Jednotlivé kombinace a typy sestav a průřezů jsou znázorněny v tabulce Tab. 1.

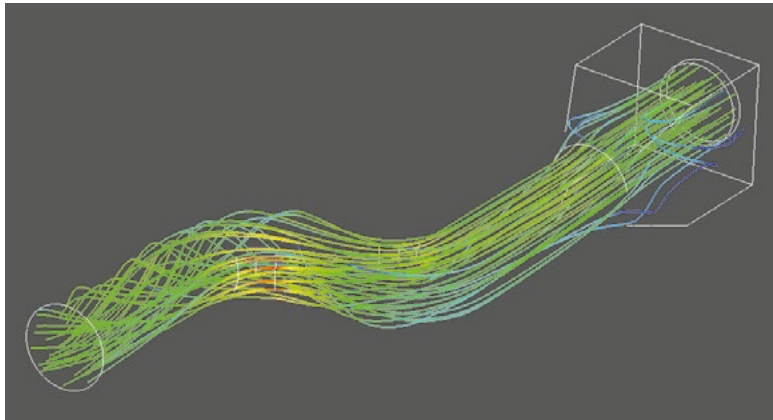
Tab. 1 Jednotlivé měřené sestavy

Průměr [mm]	Typ trasy	Délka mezilehlého kusu [mm]
100	$1 \times 45^\circ$	-
	$1 \times 90^\circ$	-
	$2 \times 45^\circ$	50
	$2 \times 45^\circ$	100
	$2 \times 45^\circ$	200
	$2 \times 90^\circ$	50
	$2 \times 90^\circ$	100
	$2 \times 90^\circ$	200
200	$1 \times 45^\circ$	-
	$1 \times 90^\circ$	-
	$2 \times 45^\circ$	100
	$2 \times 45^\circ$	200
	$2 \times 45^\circ$	400
	$2 \times 90^\circ$	100
	$2 \times 90^\circ$	200
	$2 \times 90^\circ$	400
400	$1 \times 45^\circ$	-
	$1 \times 90^\circ$	-
	$2 \times 45^\circ$	200
	$2 \times 45^\circ$	400
	$2 \times 45^\circ$	800
	$2 \times 90^\circ$	200
	$2 \times 90^\circ$	400
	$2 \times 90^\circ$	800

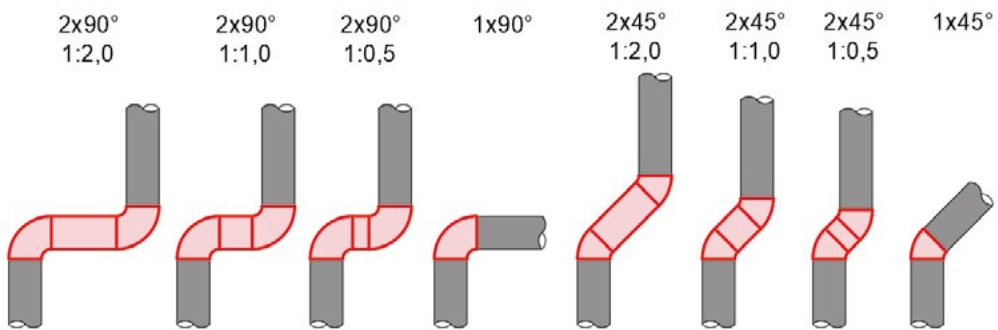
U naměřených hodnot byly stanoveny klíčové geometrické parametry tvarovky, ovlivňující tlakovou ztrátu. Následně byly pomocí metody nejmenších čtverců získány rovnice závislosti. Jako proměnné v těchto rovnicích byly zvoleny parametry D jako vnitřní průměr potrubí, R jako poloměr zaoblení kolene a L jako délka přímého mezilehlého kusu.



Obr. 1 Schéma zapojení měřících přístrojů se znázorněním zohledněných geometrických parametrů měřené trasy. Zdroj: archiv autora.



Obr. 2 Znárodnění rychlostí proudového pole prostřednictvím proudnic v aplikaci ANSYS Fluent. Zdroj: archiv autora.



Obr. 3 Měření potrubní trasy a tvarovky. Zdroj: archiv autora.

4 VÝSLEDKY

Výsledky naměřené hodnoty statických tlaků byly zpracovány podle vztahu (2) a následně metodou nejmenších čtverců byly stanoveny aproximační vztahy. Pro modely byly zvoleny následující proměnné R / D , což je podíl poloměru zaoblení kolene ku průměru potrubí a L / D , což je podíl délky mezilehlého kusu ku průměru potrubí. Pro zvolené modely byly stanoveny chyby zapsané v tabulce Tab. 2.

Tab. 2 Stanovení modelů aproximačních rovnic a vyčíslení jejich součinitelů.

Typ sestavy	Zvolený model	Vztah mezi součinitelem tlakových ztrát a geometrickým tvarem tvarovky	Residuální součet čtverců RSS	Hladina významnosti α
Koleno 1x45°	$\zeta = a \cdot e^{(\frac{R}{D})^b}$	$a = 0,071 \pm 0,002$ $b = -1,157 \pm 0,142$	0,493	0,95
Koleno 1x90°	$\zeta = a \cdot e^{(\frac{R}{D})^b}$	$a = 0,118 \pm 0,004$ $b = -3,880 \pm 0,145$	0,639	0,95
Kolena 2x45°	$\zeta = a \cdot e^{(\frac{R}{D})^b} + c \cdot \frac{L}{D}$	$a = 0,051 \pm 0,010$ $b = -4,694 \pm 0,637$ $c = 0,066 \pm 0,01025$	9,497	0,95
Kolena 2x90°	$\zeta = a \cdot e^{(\frac{R}{D})^b} + c \cdot \frac{L}{D}$	$a = 0,255 \pm 0,006$ $b = -1,548 \pm 0,082$ $c = 0,060 \pm 0,011$	10,840	0,95

Tab. 3 Aproximační vztahy s přidělenými parametry, kde R je poloměr zaoblení kolene, D je vnitřní průměr potrubí, L je délka mezilehlého kusu mezi dvěma koleny.

Typ sestavy	Vztah mezi součinitelem tlakových ztrát a geometrickým tvarem tvarovky	Interval platnosti
Koleno 1×45°	$\zeta = 0,071 \cdot e^{\frac{R^{-1,157}}{D}}$	$\frac{R}{D} = \langle 0,875 2,000 \rangle$
Koleno 1×90°	$\zeta = 0,118 \cdot e^{\frac{R^{3,000}}{D}}$	$\frac{R}{D} = \langle 0,875 2,000 \rangle$
Kolena 2×45°	$\zeta = 0,051 \cdot e^{\frac{R^{-4,694}}{D}} + 0,066 \cdot \frac{L}{D}$	$\frac{R}{D} = \langle 0,875 2,000 \rangle$, $\frac{L}{D} = \langle 0,5 2,0 \rangle$
Kolena 2×90°	$\zeta = 0,255 \cdot e^{\frac{R^{-1,510}}{D}} + 0,060 \cdot \frac{L}{D}$	$\frac{R}{D} = \langle 0,875 2,000 \rangle$, $\frac{L}{D} = \langle 0,5 2,0 \rangle$

Ze vztahů byly diskretizovány hodnoty společně s jejich geometrickými proměnnými a porovnány s tabulárně vyjádřenými hodnotami od Idelchick [6].

Tab. 4 Naměřené hodnoty součinitele tlakové ztráty, porovnané s hodnotami od Idelchick [6] (v závorkách).
Tabulární vyjádření pro kolena 2×45°.

L / D	R / D					
	0,90	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
0,5	0,296 (0,585)	0,172 (0,467)	0,105 (0,450)	0,092 (0,434)	0,088 (0,434)	0,086 (0,435)
1,0	0,329 (0,413)	0,205 (0,335)	0,138 (0,327)	0,125 (0,319)	0,121 (0,321)	0,119 (0,324)
2,0	0,395 (0,433)	0,271 (0,355)	0,204 (0,347)	0,191 (0,339)	0,187 (0,341)	0,185 (0,344)

Tab. 5 Naměřené hodnoty součinitele tlakové ztráty, porovnané s hodnotami od Idelchick [6] (v závorkách).
Tabulární vyjádření pro kolena 2×90°.

L / D	R / D					
	0,90	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
0,5	0,858 (0,992)	0,723 (0,798)	0,548 (0,777)	0,465 (0,756)	0,418 (0,762)	0,389 (0,770)
1,0	0,888 (0,693)	0,753 (0,566)	0,578 (0,558)	0,495 (0,549)	0,448 (0,558)	0,419 (0,569)
2,0	0,948 (0,713)	0,813 (0,586)	0,638 (0,578)	0,555 (0,569)	0,508 (0,578)	0,479 (0,589)

Tab. 6 Naměřené hodnoty součinitele tlakové ztráty, porovnané s hodnotami od Idelchick [6] (v závorkách).
Tabulární vyjádření pro koleno 45°.

R / D	0,90	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
ζ	0,220 (0,182)	0,193 (0,142)	0,154 (0,134)	0,133 (0,125)	0,120 (0,123)	0,111 (0,121)

Tab. 7 Naměřené hodnoty součinitele tlakové ztráty, porovnané s hodnotami od Idelchick [6] (v závorkách).
Tabelární vyjádření pro koleno 90°.

R / D	0,90	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
ζ	0,531 (0,308)	0,321 (0,242)	0,180 (0,229)	0,145 (0,217)	0,132 (0,214)	0,126 (0,211)

5 DISKUZE

Hodnoty tlakových ztrát odpovídají typu sestavy a jejich geometrickému provedení. Aproximační rovnice součinitelů tlakových ztrát jsou však omezeny svojí platností na intervaly geometrických parametrů, na kterých byly měřeny. Rovnice byly zvoleny tak, aby do jisté míry reflektovaly teoretický průběh těchto závislostí. Hodnoty naměřených tlakových ztrát mohou být zkresleny zejména nedokonalou těsnou sestavou potrubí. U potrubí s malými vnitřními průměry pak může vzniknout chyba při měření objemu proudícího vzduchu balometrem. Z tabulek je zřejmý strmější pokles hodnot se vzrůstajícím R/D pro samostatná kolena v porovnání s výsledky od Idelchick [6]. Dále je patrné, že u soustav dvou kolien se zvyšující se hodnotou L/D stoupá hodnota součinitele (pravděpodobně díky zvyšující se délce přímého mezikusku), přičemž hodnoty od Idelchick [6] mají opačnou tendenci. Lze také pozorovat značně vyšší hodnoty součinitelů pro dvojici kolien 90° oproti dvojici kolien 45°.

6 ZÁVĚR

Výzkum přináší rovnice závislosti velikosti součinitele tlakové ztráty tvarovky na jejích geometrických parametrech. Tyto rovnice vznikly laboratorním měřením reálného potrubí a jsou alternativou tabelárním hodnotám, uváděným v literatuře. Analytický zápis přitom může sloužit k automatizaci výpočtů tlakových ztrát na potrubní větvi v návrhových softwarech, kde je modelována geometrie potrubní větve. Implementací vztahů do návrhových softwarů lze zrychlit a zjednodušit výpočet tlakové ztráty potrubní větve a lze také obsáhnout celou řadu geometrických variant tvarovky díky aproximační rovnici (při tabelárních hodnotách lze narazit na omezení jednoho nebo více parametrů danou hodnotou, například omezení hodnot součinitelů tlakových ztrát v tabulce ASHRAE hodnotou podílu poloměru zaoblení kolene ku vnitřnímu průmětu potrubí na hodnotu 1,5). Získané rovnice navazují na práci výzkumu tlakových ztrát na potrubí obdélníkového průřezu a mohou, přičemž lze na tento výzkum navázat dalším měřením spojeným s hledáním analytických rovnic závislosti velikosti součinitelů tlakové ztrát dalších tvarovek na jejich geometrických parametrech.

Poděkování

Výzkum vznikl za podpory specifického výzkumu FAST-J-19-6091. Poděkování také patří Ústavu technických zařízení budov za možnost přístupu do laboratoře a domácímu Ústavu automatizace inženýrských úloh a informatiky za poskytnutí zázemí.

Použité zdroje

- [1] Schild P, Mysen M. Recommendations on Specific Fan Power and Fan System Efficiency 2009. Citace 2
- [2] Beránková E. Životní cyklus staveb. TZB-info, Praha: 2013.
- [3] Nováček M. Tlakové ztráty na vřechotechnických tvarovkách. Juniorstav 2020, Brno: Brno University of Technology; 2020, p. 868-873.
- [4] Chyský J, Hemzal K. Větrání a klimatizace. Třetí, zcela přepracované. Praha: B press Brno; 1993.
- [5] Howell R, Sauer H, Coad W. Principles of Heating, Ventilating, and Air Conditioning. ilustrované vydání. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; 2005.
- [6] Idelchick I, Grunauer D, editor, Barouch A. Handbook od Hydraulic Resistance. X/5. Moskva-Leningrad: Gosudarstvennoe Energeticheskoe Izdatel'stvo; 1960.
- [7] Laboutka K, Suchánek T. Hodnoty součinitelů místních ztrát - zdroje tepla a základní tvarovky potrubí. TZB-info, Praha: ©2001-2019.
- [8] Janalík J, Štáva P. Mechanika tekutin. n.d.

DÉLKA TRVÁNÍ ŠPIČEK V ODBĚRU VODY V BYTOVÉM DOMĚ V RŮZNÝCH DNECH

DURATION OF MAXIMUM WATER COLLECTION IN AN APARTMENT BUILDING AT DIFFERENT DAY

Jan Moštěk^{*,1}

*mostek.honza@seznam.cz

¹ Fakulta Stavební VUT v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno-střed

Abstrakt

V příspěvku jsou uvedeny poznatky z výzkumu doby trvání špičkového průtoku v bytovém domě při všech dnech měření. V první části příspěvku je popsáno měření průtoků v bytovém domě. V druhé části příspěvku je provedeno vyhodnocení naměřených dat v jednotlivých dnech v bytovém domě. V třetí části článku bude provedena diskuze vyhodnocených výsledků a v závěru příspěvku je provedeno shrnutí autorem.

Klíčová slova

Špičkový průtok, vnitřní vodovod, průtokoměr

Abstract

The contribution provides findings from research on the duration of peak flow in an apartment building at all measurement days. The first part of the contribution describes the measurement of flows in an apartment building. In the second part of the contribution is made an evaluation of the measured data in individual days in the apartment building. The third part of the article will discuss the evaluated results and a summary by the author is made the end of the article.

Key words

Maximum flow, water installation, flowmeter

1 ÚVOD

Analýzu trvání špičkových průtoků provádíme pro správné stanovení časového úseku měření maximálních průtoků v různých typech budov. Stanovení správné časového úseku měření je nejdůležitější informací pro správně provedenou výzkumnou práci a nastavení měřicí ústředny. Měření průtoků na vnitřních vodovodech v různých objektech v České republice není z důvodu různých překážek možné. Překážkami jsou především nesouhlas vlastníků objektu, ve kterém má přijít k měření na vnitřním vodovodu a osazení měřícího zařízení (průtokoměru) do potrubí. Nemožnost osazení průtokoměru do potrubí nebo připojení měřicí ústředny na elektrickou energii a zajištění uzamykatelné místnosti, z důvodu ochrany měřicí ústředny. Měření tudíž provádíme především při různých příležitostech a opravách vnitřních vodovodů v objektu.

V roce 2019 bylo provedeno měření na bytovém domě se 150 bytovými jednotkami. Průtok vody v objektu byl měřen každou sekundu.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

V dané kapitole bude popsán skutečný stav na měřeném objektu.

Měření v bytovém domě

V bytovém domě proběhlo měření od 3. 5. do 20. 5. 2019. Bytový dům má devět nadzemních podlaží a nachází se v něm 150 bytů. V době měření byly některé bytové jednotky neobydlené a při stanovení výpočtového průtoku bylo počítáno pouze se 145 byty. Přibližný počet obyvatel nacházejících se v bytovém domě v průběhu měření byl 268 osob. Ohřívač vody je ústřední. Měřicí zařízení průtokoměru bylo osazeno na hlavním přívodním potrubí v bytovém domě Obr. 1 navazujícím na přívod vody od vodoměrné sestavy na vodovodní přípojce. V místnosti s osazeným průtokoměrem byla umístěna měřicí ústředna, která byla připojena k průtokoměru Obr. 1. [1].



Obr. 1 Osazení průtokoměru CONTROL-PLUS a měřicí ústředny KHS-Mini MASTER 2.0 v druhém bytovém domě.

3 METODIKA

Při provádění měření průtoku v různých objektech provádíme měření pomocí průtokoměru připojenému k měřicí ústředně. Měření musí být prováděno po dobu nejméně 14 dní, aby byla naměřená data dostačující k analýze doby maximálních průtoků [1].

Pro měření na řešeném bytovém domě byl použit mechanický lopatkový průtokoměr, který funguje na principu působení dynamického tlaku vody na oběžné kolo. Otáčivý pohyb lopatkového kola se přes převodové ústrojí přenáší na číselník.

Při prováděném měření je měřicí ústředna vždy nastavena k měření průtoků trvajících jednu sekundu. Při daném nastavení zařízení se musí v průběhu měření data ukládat. Aby se zmenšila pravděpodobnost chybného ukládání dat, provádíme při jejich sběru kontrolu zařízení a tím eliminujeme možnou chybu.

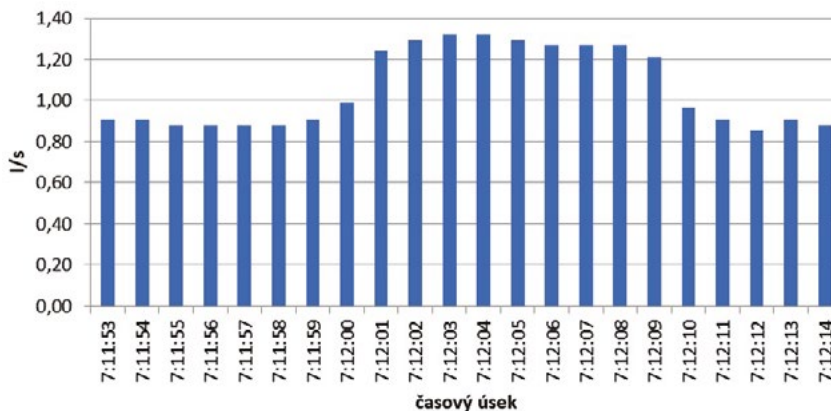
Následuje ukládání posledních naměřených dat a odpojení měřicí ústředny s měřicím zařízením.

Dále provádíme ukládání naměřených dat do počítače s následným rozříděním dat podle dnů měření a vyhodnocení naměřených výsledků. Vzhledem k nastavení měřicí ústředny s ukládanými daty můžeme provést mnoho vyhodnocení různých výsledků. V daném výzkumu se provádělo měření průtoku na vnitřním vodovodu v bytovém domě. Vyhodnocení výsledků výzkumu se provádí pomocí tabulkových hodnot s následným grafickým vyhotovením naměřených dat.

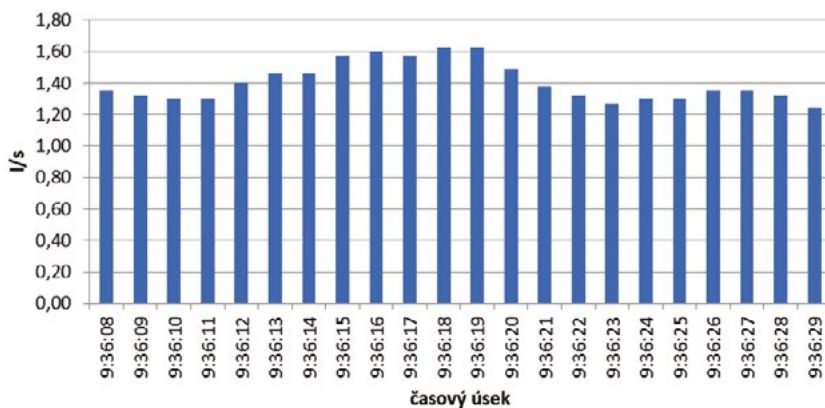
4 VÝSLEDKY

V bytovém domě proběhlo měření od 3. 5. do 20. 5. 2019. V tomto příspěvku jsou vyhodnoceny pouze grafy od 3. 5. do 10. 5. 2019. Hodnoty maximálních špičkových průtoků naměřené v jednotlivých dnech v bytovém domě se pohybovaly od 1,32–3,56 l/s. Průtok 3,56 l/s byl naměřen v neděli 19. 5. 2019. Tento graf není v příspěvku obsažen a není nutný pro řešenou problematiku, protože se patrně jednalo o chybu v měření nebo vodní ráz [1].

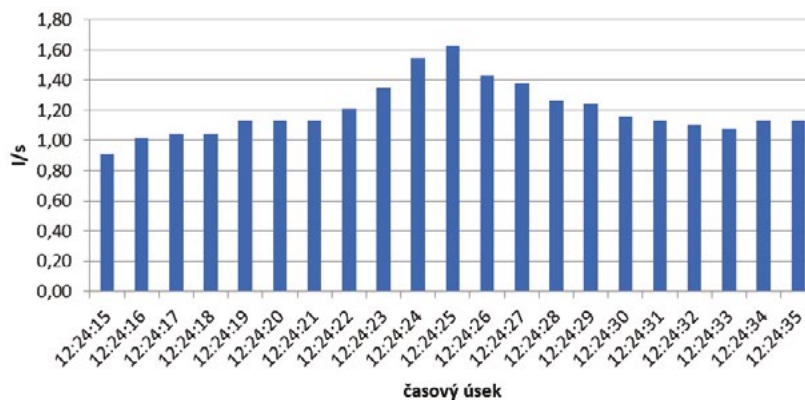
Z výsledků je patrné, jakou mají špičkové průtoky délku trvání. V minulosti se prováděla měření průtoků v objektech po minutách, desítkách sekund nebo hodinách. Z vyhodnocení výsledků je patrné, proč byla dřívější měření na objektech nepřesná, a proto v současné době provádíme přesnější měření na různých typech budov. V grafech vidíme, že maximální délka trvání odběrových špiček se pohybuje v řádu jednotek sekund. Proto musí být měření prováděno každou sekundu, aby mohl být přesně stanoven maximální průtok potrubím v objektu.



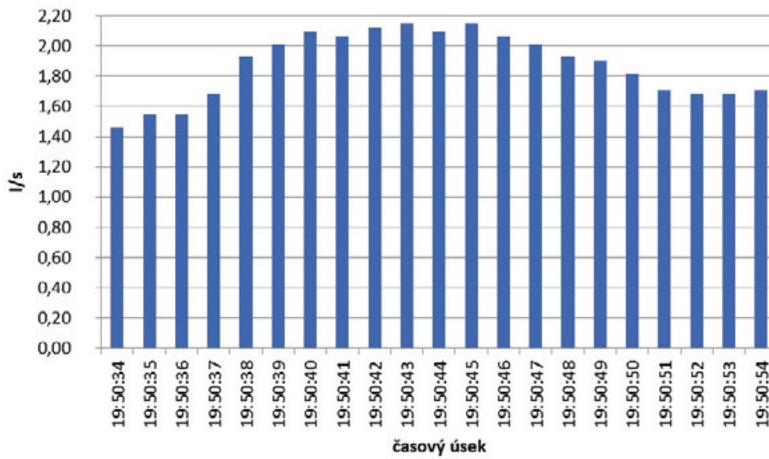
Obr. 2 Průtok l/s – pátek 3. 5. 2019. Doba maximálního odběru vody.



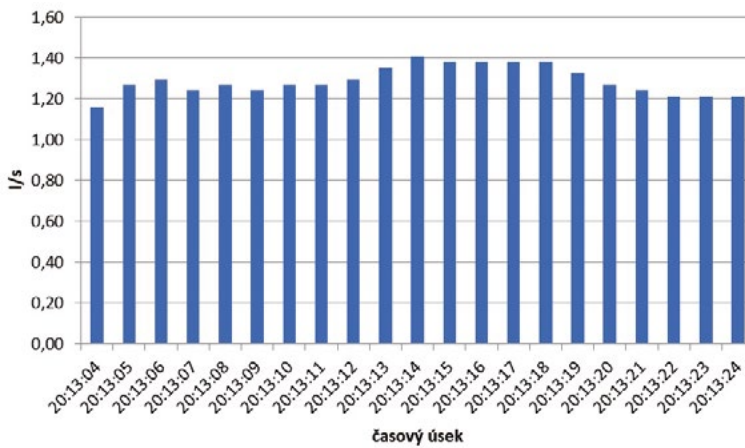
Obr. 3 Průtok l/s – sobota 4. 5. 2019. Doba maximálního odběru vody.



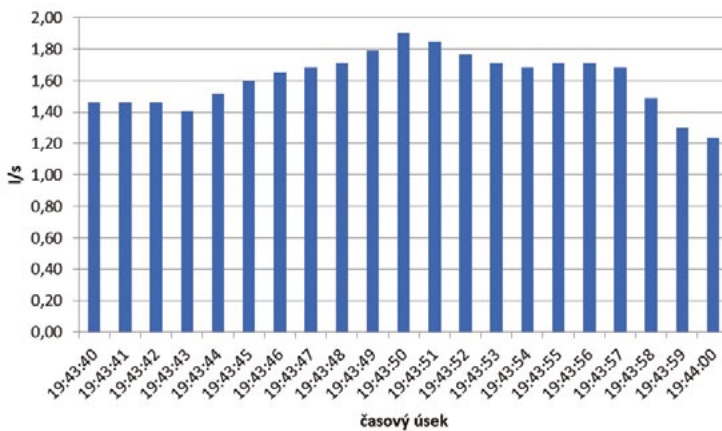
Obr. 4 Průtok l/s – neděle 5. 5. 2019. Doba maximálního odběru vody.



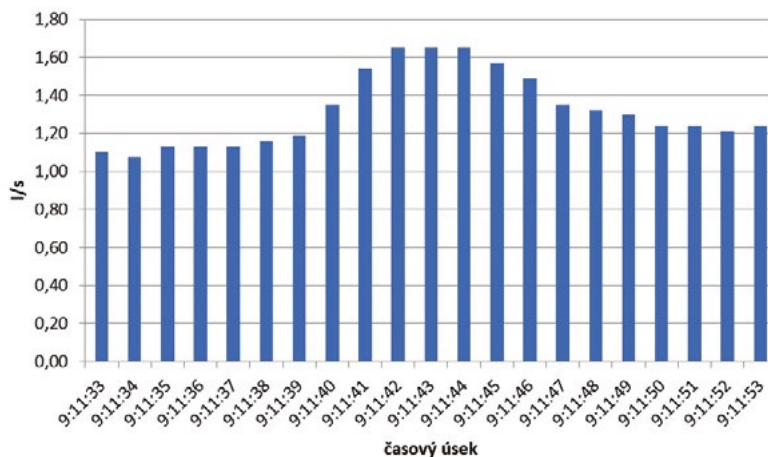
Obr. 5 Průtok l/s – pondělí 6. 5. 2019. Doba maximálního odběru vody.



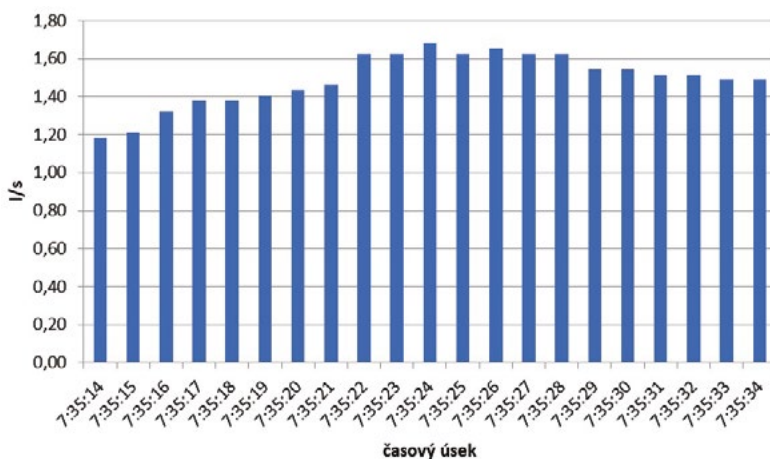
Obr. 6 Průtok l/s – úterý 7. 5. 2019. Doba maximálního odběru vody.



Obr. 7 Průtok l/s – středa 8. 5. 2019. Doba maximálního odběru vody.



Obr. 8 Průtok l/s – čtvrtek 9. 5. 2019. Doba maximálního odběru vody.



Obr. 9 Průtok l/s – pátek 10. 5. 2019. Doba maximálního odběru vody.

5 DISKUZE

Provedl jsem interpretace vyhodnocených výsledků měření v bytovém domě a výsledky měření a vyhodnocení jsou uvedeny v grafech. Dříve nebyla vhodná kapacita úložišť pro velké množství dat z měření, aby se mohlo provádět přesnější měření, a to měření každou sekundu.

V další fázi výzkumu se mohou provádět měření na různých typech budov s různými účely, aby tak mohla být v budoucnu provedena úprava stanovení výpočtu průtoků. Zde se ovšem setkáváme s největším omezením výzkumné práce, jelikož ne všichni majitelé objektů jsou ochotni ke spolupráci a k přístupu měření na jejich objektech, což znamená i částečný zásah do již provedeného potrubí vnitřního vodovodu.

Při vyhodnocení dat je patrné, že se potvrdily předpokládané závěry z měření. Pro nejpřesnější měření maximálních průtoků je nezbytné určit správný interval pro měření. V současné době se provádí měření v jednotkách a desítkách sekund. Ve výše uvedených grafech vidíme, že maximální délka trvání odběrových špiček se pohybovala v řádu jednotek sekund. Proto je jedinou správnou možností měření interval 1 sekundy.

Pro další výzkumnou práci je nutné tento interval měření dodržovat, aby byla měření co nejvíce směrodatná a dala se používat pro úpravy vztahů pro dimenzování vnitřních vodovodů, stanovení spotřeby vody v objektu atd.

6 ZÁVĚR

Po vyhodnocení naměřených výsledků byly potvrzeny očekávané předpoklady a potvrdily se hypotézy z dřívějších výzkumných prací, kde bylo zjištěno, že správné nastavení intervalu měření, je nedílnou součástí výzkumné práce. Pro nejpřesnější stanovení maximálního špičkového průtoku vody v objektech musí být nastavena odečet průtoku každou sekundu.

Při dané výzkumné práci je možné i nadále pokračovat v měřeních na dalších objektech. V další fázi výzkumu se může provádět měření na různých typech budov s různými účely, aby tak mohla být s jistotou vyhodnocena naše hypotéza o správném nastavení časového intervalu měření i pro jiné než bytové objekty.

Naměřená data jsou využitelná pro přesnější a jednodušší návrh dimenzí vnitřních vodovodů a vodovodních přípojek.

Měření mohlo být provedeno díky přidělenému specifickému výzkumu z Měření a analýzy špičkových průtoků a spotřeb vody v budovách.

Použité zdroje

- [1] Ing. VRÁNA, Jakub, Ph.D., Ing. MOŠTĚK Jan. Měření průtoků a spotřeb vody v bytových domech. SANHYGA 2019, 24. mezinárodní vedecko-technická konference. 2019, 10. 978-80-89878-49-9
- [2] ČSN 75 5455 Výpočet vnitřních vodovodů. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2014
- [3] Změna Z1 ČSN 75 5455 Výpočet vnitřních vodovodů. Česká agentura pro standardizaci. 2018
- [4] Methods of Estimating Loads in Plumbing Systems, R. B. Hunter. 1940
- [5] Measurements of water consumption in apartment buildings, B. Bleys, P. Van den Bossche, X. Kuborn. 2012

PREDIKCE ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI HELMHOLTZOVÝCH REZONÁTORŮ PRO ÚČELY INŽENÝRSKÉ PRAXE

PREDICTION OF SOUND ABSORPTION COEFFICIENT OF THE HELMHOLTZ RESONATORS FOR ENGINEERING PRACTICE

Ondřej Nespěšný^{*1}, David Jun^{**1}

^{*}ondrej.nespesny@vut.cz, ^{**}david.jun@vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Helmholtzův rezonátor je ve stavební praxi jedním z velmi rozšířených pohlcovačů pro tlumení nízkých až středních kmitočtů slyšitelného spektra. Pro velkou část návrhů prostorové akustiky je možné aplikovat komerční produkty v různých konstrukčních formách. V případě nutnosti potlačit specifické pásmo nám však tyto produkty nestačí a je nutné přistoupit k vlastnímu návrhu. Ten je možné provést například metodou elektro-akustické analogie prezentovanou také v tomto příspěvku. Jde o metodu nenáročnou na výpočetní výkon, která však není v současné praxi běžně využívána. Příspěvek sleduje srovnání výpočtu činitele zvukové pohltivosti touto metodou s hodnotou změřenou v dozvukové místnosti.

Klíčová slova

Helmholtzův rezonátor, činitel zvukové pohltivosti, elektro-akustická analogie

Abstract

The Helmholtz resonator is one of the most common absorbers for attenuating the low to medium frequencies of the audible spectrum. For a large part of room acoustics designs, it is possible to apply commercial products in various construction forms. However, if it is necessary to suppress a specific band, these products are not enough for us and it is necessary to proceed to our own design. This can be done, for example, by the method of electro-acoustic analogy presented also in this paper. It is a method that is not demanding on computing power, but it is not commonly used in current practice. The paper follows the comparison of the calculation of the sound absorption coefficient by this method with the value measured in the reverberation room.

Key words

Helmholtz resonator, sound absorption coefficient, electro-acoustic analogy

1 ÚVOD

Helmholtzův rezonátor je typem akustického rezonátoru s otevřenou konstrukcí, který se v běžném prostředí budov vyskytuje ve formě děrovaných předstěn či stropů a představuje nejčastěji řešení konkurenční k porézním pohlcovačům. Zavedení výrobci v tomto ohledu cílí především na co nejširší komerční uplatnění, což vede k produktům konstruovaným pro účinnost v širokém frekvenčním pásmu od středních do vysokých kmitočtů.

Jak je ale obecně známo, výzvu v oblasti prostorové akustiky představuje především tlumení kmitočtů nízkých, ať už jde o prosté zkracování doby dozvuku nebo potýkání se s určitým dominantním módem místnosti. I zde, a spíše především zde, představují rezonátory prostorově málo náročné a zároveň efektivní řešení. Na rozdíl od porézních pohlcovačů navíc může rezonátor působit útlum pouze na úzkém frekvenčním pásmu, což je často výhodné z hlediska zabránění přetlumení ve vyšších oktávách. Přes všechny tyto výhody je kvůli malé poptávce často nemožné nalézt komerční produkt vyhovující potřebám specifické místnosti a je nutné přistoupit k vlastnímu návrhu takové konstrukce.

Ten v současné praxi probíhá nejčastěji graficky, což je pozůstatek doby, kdy chyběl výpočetní výkon pro detailní výpočet. Tento příspěvek prezentuje metodu elektro-akustické analogie, která není nová ve smyslu

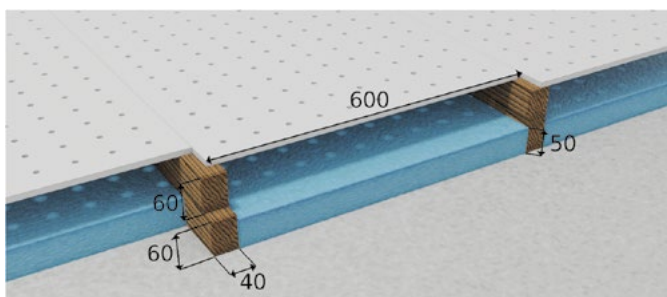
přístupu nebo fyzikálního vyjádření chování, pouze se dnes díky výpočetní technice stala jednoduchou pomůckou pro návrh nejen děrovaných rezonátorů. Tento návrh bude dále porovnán s měřením v dozvukové místnosti.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU

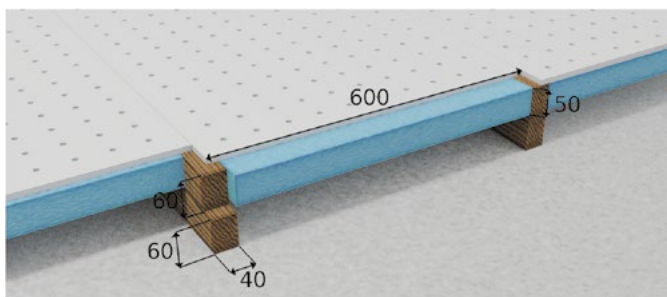
Základy metody elektro-akustické analogie byly popsány již řadou zahraničních vědců v minulosti. Výpočet charakteristické impedance porézního materiálu publikovali autoři Delany a Bazley [1] již v roce 1970, vliv tvaru a velikosti čtvercových a kruhových otvorů na kmitající hmotu v hrdle rezonátoru definovali Cremer a Müller [2] v roce 1978. Ve stejné publikaci [2] je pak možné nalézt i podklady pro grafický návrh rezonátoru nebo odvození analogického elektrického obvodu k rezonanční soustavě. Tyto a další jednotlivosti, mnohdy výrazně mladšího data, shrnují do použitelného postupu výpočtu Trevor J. Cox a Peter d'Antonio v obsáhlé knize *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application* [3].

3 METODIKA

V rámci tohoto příspěvku je porovnán výpočet a měření činitele zvukové pohltivosti dvou variant uspořádání konstrukce rezonátorů. Výstupem výpočtu je číselný koeficient zvukové pohltivosti pro kolmý dopad vln, zatímco výstupem měření v dozvukové místnosti je Sabinův koeficient zvukové pohltivosti. To jsou obecně rozdílné veličiny, ale Cox a d'Antonio [3] uvádějí, že v případě Helmholtzových rezonátorů se jejich průběh zásadně neliší. Varianta (a) viz Obr. 1, kdy je horní líc porézního materiálu s ohledem na konstrukci testovací stolice ve vzdálenosti 70 mm od spodního líce děrované cementovláknité desky, tzn. v nejvzdálenější poloze od desky. Varianta (b) viz Obr. 2, kdy je horní líc porézního materiálu v těsné blízkosti cementovláknité děrované desky. Poloha porézního deskového materiálu byla ve variantě (b) zajištěna rastrem ze silonových vláken, na které byla ukládána. Děrovaná deska byla s ohledem na materiálové vlastnosti a rezonanční kmitočty zvolena v tl. 10 mm a pomocí CNC zařízení byla děrovaná kruhovými otvory s průměrem 10 mm v pravidelném čtvercovém rastru s osovou roztečí 56 mm. Měrný odpor proti proudění vzduchu porézního materiálu byl experimentálně stanoven na $\sigma = 4,008 \text{ kPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$.



Obr. 1 Schéma uspořádání (a) s ohledem na polohu porézního materiálu při měření činitele zvukové pohltivosti, specifikace rozměrů rezonátoru



Obr. 2 Schéma uspořádání (b) s ohledem na polohu porézního materiálu při měření činitele zvukové pohltivosti, specifikace rozměrů rezonátoru



Obr. 3 Dozvuková místnost při experimentálním měření činitele zvukové pohltivosti, detail zkušební vzorku

Měření bylo prováděno metodou přerušovaného šumu dle ČSN EN ISO 354 [4], za použití všesměrového zdroje a měřicího mikrofону. Zařízení byla připojena přes zvukovou kartu do PC, kde byl generován šum a zaznamenáván dozvuk. Na Obr. 3 je zachyceno prostředí dozvukové místnosti a aplikace cementovláknitých desek při experimentálním měření. Rozmístění difuzorů bylo provedeno náhodně tak, aby byla zvýšena difuzivita zvukového pole, viz Obr. 3.

Základem metody je výpočet charakteristických impedancí jednotlivých vrstev konstrukce, které jsou pak pomocí vztahů vycházejících z tzv. přenosové matice zkombinovány do výsledné povrchové impedance na povrchu rezonátoru. Tento postup je blíže specifikován v následujících odstavcích. Charakteristickou impedancí vzduchové vrstvy je možné spočítat ze vztahu:

$$z_{air} = c \times \rho, \quad (1)$$

kde c [ms^{-1}] představuje rychlost šíření zvuku ve vzduchu, ρ [kgm^{-3}] hustota vzduchu.

Výpočet charakteristické impedance z_c [$kPa \cdot s \cdot m^{-1}$] a komplexního vlnového čísla k [m^{-1}] porézního materiálu na bázi PES vláken podle Garai-Pompoli [4] modelu vychází ze známé hodnoty měrného odporu proti proudění vzduchu σ [$kPa \cdot s \cdot m^{-2}$] tohoto materiálu. Samotný výpočet je tvořen následujícími vztahy [1], [4]:

$$X = \frac{\rho \times f}{\sigma}, \quad (2)$$

$$z_c = \rho \times c \times (1 + 0,078 \times X^{-0,623} - i \times 0,074 \times X^{-0,660}), \quad (3)$$

$$k = \frac{2 \times \pi}{c} \times f \times (1 + 0,121 \times X^{-0,530} - i \times 0,159 \times X^{-0,571}), \quad (4)$$

kde X [-] je bezrozměrná veličina pro výpočet, ρ [kgm^{-3}] hustota vzduchu, i [-] imaginární jednotka a f [Hz] frekvence.

Tyto měrné impedance se dále kombinují a vypočítá se impedance na povrchu první (z_1 [$kPa \cdot s \cdot m^{-1}$]) a druhé vrstvy (z_2 [$kPa \cdot s \cdot m^{-1}$]) [6]:

$$z_1 = -i \times z_{c1} \times \cot(k_1 \times l_1), \quad (5)$$

$$z_2 = \frac{-i \times z_1 \times z_{c2} \times \cot(k_2 \times l_2) + z_c^2}{z_1 - i \times z_{c2} \times \cot(k_2 \times l_2)}, \quad (6)$$

kde z_{c1} [$kPa \cdot s \cdot m^{-1}$] resp. z_{c2} je charakteristická impedance vrstvy, k_1 resp. k_2 [m^{-1}] je vlnové číslo vrstvy a l_1 resp. l_2 [m] je tloušťka vrstvy.

Impedanci na povrchu rezonátoru z_3 [$kPa \cdot s \cdot m^{-1}$] je poté možné určit ze vztahu [6]:

$$z_3 = r_m + z_m + z_2, \quad (7)$$

kde r_m [$kPa \cdot s \cdot m^{-1}$] je akustický odpor otvorů a z_m [$kPa \cdot s \cdot m^{-1}$] impedance kmitající hmotnosti otvoru. Tyto získáme pomocí vztahů [6]:

$$r_m = \frac{\rho}{\varepsilon} \times \sqrt{8\nu\omega} \left(1 + \frac{t}{2a}\right), \quad (8)$$

$$z_m = \frac{i\omega\rho}{\varepsilon} \left[t + 2\delta a + \sqrt{\frac{8\nu}{\omega} \left(1 + \frac{t}{2a}\right)} \right], \quad (9)$$

kde ε [–] je číselník děrování, t [m] je tloušťka desky, a [m] je poloměr otvoru, ν [m^2s^{-1}] je kinematická viskozita vzduchu a δ [–] je koncová korekce dle Cremera a Müllera [2].

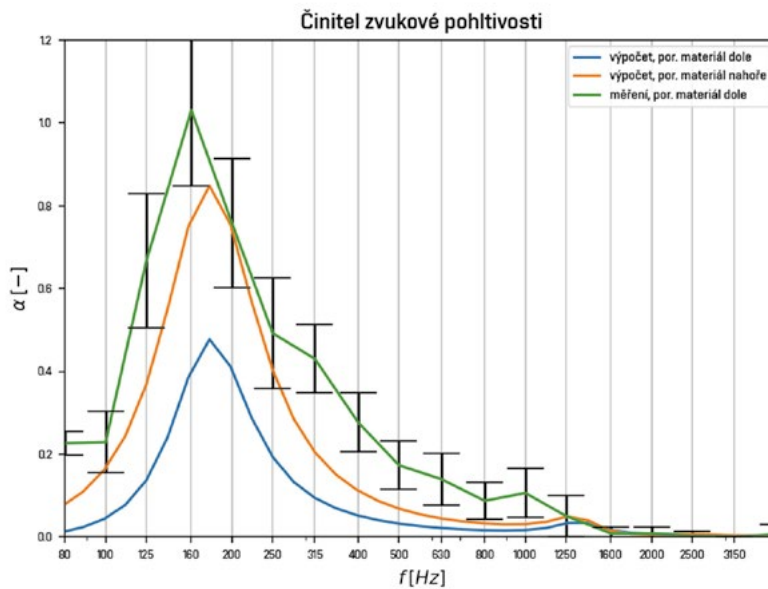
Číselník odrazu pro kolmý dopad vln R [–] a číselník zvukové pohltivosti pro kolmý dopad vln α [–] se na závěr vypočte ze vztahů:

$$R = \frac{z_3 - z_{air}}{z_3 + z_{air}}, \quad (10)$$

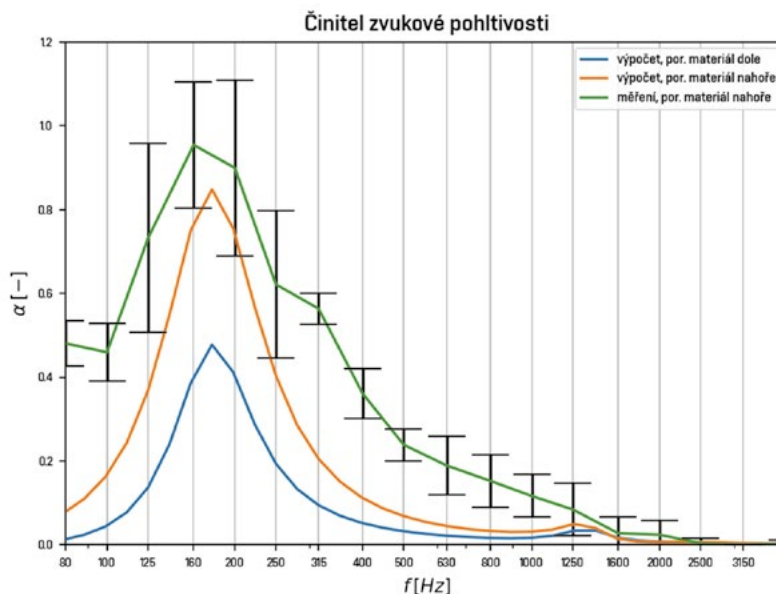
$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (11)$$

4 VÝSLEDKY

Obr. 4 a Obr. 5 znázorňují srovnání výpočtu rezonátoru s naměřenou hodnotou. Oba grafy obsahují jednak křivky výpočtu pro obě varianty polohy porézního materiálu v dutině, jednak výsledný průběh naměřeného číselníku zvukové pohltivosti jedné z variant. Vypočtené křivky se tedy v obou grafech shodují.



Obr. 4 Průběh číselníku zvukové pohltivosti varianty (a), srovnání experimentálně stanovených hodnot s vypočtenými hodnotami.



Obr. 5 Průběh činitele zvukové pohltivosti varianty (b), srovnání experimentálně stanovených hodnot s vypočtenými hodnotami.

Výpočet se dle příložených grafů Obr. 4, Obr. 5 v obou případech shoduje v rezonanční frekvenci, která činí 180 Hz, ale poloha porézní vrstvy výrazně zasahuje do výsledného maxima činitele zvukové pohltivosti α [-], které se zde pohybuje v rozmezí 0,5 až 0,85. Jakost rezonátoru se s polohou výplně téměř nemění.

Experimentálně stanovené hodnoty se oproti výpočtu vzájemně liší méně. Rezonanční frekvence se v obou případech pohybuje okolo 160 Hz a poloha porézní výplně má vliv především na jakost rezonátoru, ne tolik na maximum činitele zvukové pohltivosti, který zde dosahuje hodnoty 0,95 až 1. Větší hodnoty dosahuje varianta s porézním materiálem vzdáleným od perforované desky.

5 DISKUZE

Výsledky ukazují, že výpočet je v zásadě dostatečně přesný pro určení rezonanční frekvence. Odchyłka mezi výpočtem a měřením zde může být způsobena např. nepřesností výroby desek, nepřesností ve vypočtené koncové korekci δ nebo odlišnou velikostí ekvivalentní dutiny vůči krajní řadě otvorů v reálné desce.

V případě činitele zvukové pohltivosti je situace podstatně odlišná. Z výsledků je patrné, že výpočet, především varianty (a), značně podhodnocuje maximum této veličiny. To může být způsobeno například nepřesností materiálového modelu porézní výplně, který byl vypracován pro materiál jistých vlastností, které mohou mít v závislosti na technologii výroby značné rozpětí. Průběhy měření se co do tvaru víceméně shodují s výpočtem, zajímavý je ale fakt, že v případě měření poloha porézní výplně maximální hodnotu téměř neovlivňuje. Je patrné jisté rozšíření účinnosti v případě varianty (b), není však výrazné. Nevýraznost tohoto rozdílu může být do jisté míry způsobena nízkou hodnotou σ [$kPa \cdot s \cdot m^{-2}$] porézní výplně, která by pro tuto konstrukci rezonátoru mohla být násobně vyšší. Takový materiál však nebyl dostupný v době měření.

6 ZÁVĚR

Výpočet metodou elektro-akustické analogie představuje určitý pokrok vůči grafickým metodám, a to jak z hlediska přesnosti, tak z hlediska rychlosti návrhu. Výsledky v případě rezonanční frekvence dosahují průměrné přesnosti pro použití v inženýrské praxi, průběhy činitele zvukové pohltivosti je však nutné brát s jistým odstupem a srovnávat s vlastní zkušeností.

Na základě vyhodnocených dat lze usoudit, že výpočet výslednou pohltivost spíše podhodnocuje, v některých případech i výrazně a je důležité uvažovat s rizikem tzv. přetlumení navrhovaného prostoru. Následný výzkum by měl směřovat ke zpřesnění predikce chování porézní výplně uvnitř akustických rezonátorů a k ověření míry nezávislosti chování rezonátorů na úhlu dopadajícího zvuku.

Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory projektu FAST-J-20-6458 "Využití kompozitních desek na bázi cementu a organických vláken v kombinaci s porézními deskami z recyklovaných vláken pro konstrukci prvků prostorové akustiky" a FAST-S-20-6523 " Analýza vzduchotěsnosti stavebních konstrukcí realizovaných pomocí technologie 3D tisku".

Použité zdroje

- [1] DELANY, M. E. a E. N. BAZLEY. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*. 1970, 1970(3), 105-116.
- [2] CREMER, Lothar a Helmut A. MÜLLER. Principles and applications of room acoustics. New York, NY, USA: Sole distributor in the USA and Canada, Elsevier Science Pub. Co., c1982. ISBN 08-533-4114-1.
- [3] COX, Trevor J. a Peter. D'ANTONIO. Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application. 2nd ed. New York: Taylor, c2009. ISBN 978-0-415-47174-9.
- [4] ČSN EN ISO 354 (730535) Akustika. Měření zvukové pohltivosti v dozvukové místnosti. Český normalizační institut. Praha, 2003.
- [5] GARAI, Massimo a Francesco POMPOLI. A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications. *Applied Acoustics*. 2005, 66(12), 1383-1398. ISSN 0003682X. Dostupné z: doi:10.1016/j.apacoust.2005.04.008
- [6] ALLARD, J.-F a Noureddine ATALLA. Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-746615.


ČESKOMORAVSKÝ
ŠTERK
HEIDELBERGCEMENT Group

ČESKOMORAVSKÝ
CEMENT
HEIDELBERGCEMENT Group

ČESKOMORAVSKÝ
BETON
HEIDELBERGCEMENT Group



STABILNÍ PARTNER PRO STAVBU

 heidelbergcement.cz



Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě je samosprávná stavovská organizace se sídlem v Praze a s působností pro Českou republiku. ČKAIT sdružuje jako řádné členy všechny autorizované inženýry a autorizované techniky činné ve výstavbě.

KOMORA JE PRÁVNICKOU OSOBOU, DO JEJÍ PŮSOBNOSTI NÁLEŽÍ ZEJMÉNA:

- pečovat o stavební kulturu a o kulturu utváření prostředí,
- spolupůsobit při ochraně veřejných zájmů v oblasti výstavby, architektury a územního plánování,
- udělovat, odmítnat a pozastavovat autorizaci,

Autorizace je nutnou podmínkou pro výkon vybraných činností ve výstavbě, jak je uvedeno v §158 zákona č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon) v platném znění.

VYBRANÝMI ČINNOSTMI VE VÝSTAVBĚ JSOU:

- projektová činnost ve výstavbě, kterou se rozumí zpracování územně plánovací dokumentace, územní studie, dokumentace pro vydání územního rozhodnutí a projektové dokumentace zejména pro vydání stavebního povolení, pro ohlašované stavby podle §104 odst. 2 písm. a) až e), pro provádění stavby a pro nezbytné úpravy, a
- odborné vedení provádění stavby nebo její změny.

PROJEKTANT

- odpovídá za správnost, celistvost a úplnost jím zpracované územně plánovací dokumentace, územní studie a dokumentace pro vydání územního rozhodnutí, zejména za respektování požadavků z hlediska ochrany veřejných zájmů a za jejich koordinaci. Je povinen dbát právních předpisů a působit v součinnosti s příslušnými orgány územního plánování a dotčenými orgány (§159 odst. 1 stavebního zákona).

STAVBYVEDOUČÍ

- je osoba, která zabezpečuje odborné vedení provádění stavby nebo její změny – musí mít pro tuto činnost oprávnění podle zákona 360/1992 Sb. – autorizaci (§153 odst. 1 a 2 stavebního zákona).

- Provádět stavbu může jako zhotovitel jen stavební podnikatel, který při její realizaci zabezpečí odborné vedení stavby stavbyvedoucím (§160 odst. 1 stavebního zákona).

www.ckait.cz

The screenshot shows the website of the Czech Association of Architects and Engineers (ČKAIT). The main navigation bar includes 'Výhledová FB', 'Tisková zpráva', 'Aktuality ČKAIT', 'Pro nás', 'Kontakty', and a search icon. The main content area features a large image of a construction site with a yellow excavator. Below the image is a news article titled 'Rozhodnutí o novém předsedovi ČKAIT, Ing. Robertem Špalíkem'. The article text reads: 'Leden 2020 (Srovnávací deněš) - leden 2020, podle nové předložené ČKAIT, předsedou ČKAIT se stal Ing. Robert Špalík, který dovedl tři pracovní přetovarování ČKAIT jako místopředseda. V období pro se stal neprospěšným předsedou ČKAIT, jaký je to pozice?' The article is dated 12. 12. 2019. Other news items are visible in a grid below, including 'Výsledky voleb do nejvyšších orgánů ČKAIT ve dni 12. a 13. 12. 2020', 'Poděkování Ing. Pavla Křečka', and 'Rakodilnice veřejného stavebního práva'. A sidebar on the right contains a 'Tisková zpráva' section with a table of news items and a 'Technické pracovní a odborné' section with a table of technical staff. The footer includes social media icons for Facebook and LinkedIn, and a 'Sdílet' button.

Ecophon
SAINT-GOBAIN
A SOUND EFFECT ON PEOPLE

GLASSOLUTIONS
SAINT-GOBAIN

ISOVER
SAINT-GOBAIN

Rigips
SAINT-GOBAIN

weber
SAINT-GOBAIN

OD NÁVRHU PO REALIZACI SE SKUPINOU SAINT-GOBAIN



PROJEKT A DOKUMENTACE

Pomůžeme vám s přípravou projektové dokumentace, máme vlastní tým odborníků.



PŘÍPRAVA A REALIZACE STAVBY

Poskytneme vám poradenství přímo na stavbě.



OBCHODNÍ PODMÍNKY

Zajistíme vám obratem kalkulace a řešení objednávek a logistiky.



CERTIFIKACE A MEŘENÍ PARAMETRŮ

Zabezpečíme vám dostatečný počet bodů pro certifikaci LEED a BREEAM.



**CIVIL
ENGINEERING
JOURNAL**

<https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/cej/index>

cej-redaction@cvut.cz



CTU

**CZECH TECHNICAL
UNIVERSITY
IN PRAGUE**



GEODETICKÝ a KARTOGRAFICKÝ OBZOR



Recenzovaný odborný a vědecký časopis
Českého úřadu zeměměřického
a katastrálního



a
Úřadu geodézie, kartografie
a katastra Slovenskej republiky.

Periodikum, vycházející měsíčně, plní funkci odbornou, vědeckou, výchovně-vzdělávací a společenskou v okruhu odborníků v geodézii, kartografii a katastru nemovitostí působících ve státní správě, ve výzkumu, v pedagogickém a vzdělávacím procesu a v komerční sféře. Geodetický a kartografický obzor reprezentuje úroveň oboru a je jediným časopisem s tímto obsahovým zaměřením, který vychází společně v České republice a Slovenské republice.



<http://www.egako.eu>

<http://www.geobibline.cz/cs>

REDAKCE A INZERCE:



ZEMĚMĚŘICKÝ ÚŘAD
Pod sídlištěm 9, 182 11 Praha 8
tel.: 00420 284 041 530, 00420 284 041 656
e-mail: gako@egako.eu



ÚRAD GEODÉZIE, KARTOGRAFIE A KATASTRA SR
Chlumeckého 2, 820 12 Bratislava 212
tel.: 00421 220 816 053
e-mail: gako@egako.eu



GEODÉZIE
KATASTR NEMOVITOSTÍ
KARTOGRAFIE
GEOINFORMATIKA
NOVINKY
Z ČINNOSTI ORGÁNŮ A ORGANIZACÍ
OSOBNÍ ZPRÁVY
SPOLEČENSKO-ODBORNÁ ČINNOST
ZE ZAHRANIČÍ
DISKUZE, NÁZORY, STANOVISKA
ZPRÁVY ZE ŠKOL
Z GEODETICKÉ A KARTOGRAFICKÉ PRAXE
Z MEZINÁRODNÍCH STYKŮ
LITERÁRNÍ RUBRIKA
Z HISTORIE
NEKROLOGY
MAPY A ATLASY
ZAJÍMAVOSTI
Z GEODETICKÉHO
A KARTOGRAFICKÉHO KALENDÁŘE



tzbinfo
www.tzb-info.cz

Největší stavební portál

pro odborníky v ČR

- ✓ vytápění
- ✓ úspory energie
- ✓ dotace
- ✓ zateplení
- ✓ prostup tepla
- ✓ ohřev vody
- ✓ tepelné ztráty
- ✓ akustika
- ✓ náklady na vytápění
- ✓ požární bezpečnost

Samostatná rubrika Větrání škol



Brněnské komunikace

Společnost Brněnské komunikace a.s. je akciovou společností, jejímž jediným akcionářem je statutární město Brno. Zajišťuje zejména inženýrskou činnost dopravních a pozemních staveb, projekční činnost a majetkoprávní přípravu chystaných staveb, zpracovává prognózy, plány a modely dopravy

Na území města Brna spravuje a udržuje v činnosti světelnou signalizaci na křižovatkách, dopravní značení, dohlíží na stav komunikací a dopravních staveb vč. tunelů. Je také pověřena organizací dopravy v klidu. Neoddělitelnou součástí širokého spektra činností jsou i geodetické práce, zimní a letní údržba komunikací a centrální řízení dopravy ve městě Brně.

PIS PECHAL, s.r.o.



Projektová činnost

- projekty silničních mostů, železničních mostů a lávek pro pěší
- projekty silnic a místních komunikací
- projekty oprav, zesílení a rekonstrukcí mostů
- projekty montáže ocelových konstrukcí
- expertní a poradenská činnost v oboru ocelových konstrukcí
- provádění hlavních a mimořádných prohlídek mostů pozemních komunikací
- zajištění generálního projektanta u staveb pozemních komunikací

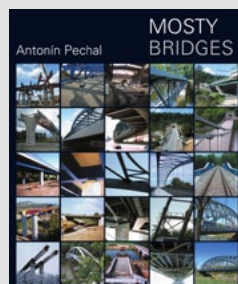
Výrobní dokumentace

- kompletní 3D model konstrukce v programu Siemens NX, asociativní vytvoření 2D výrobních výkresů
- export modelu do formátu 3D PDF (jednoduché prohlížení, měření a ovládání struktury modelu v programu Adobe Reader)
- export dat pro pálicí zařízení ve formátu DSTV (NC data, výkazy materiálu)

Inženýrská činnost

- zajištění autorských dozorů u všech námi projektovaných staveb
- provádění kontroly výroby, montáže a nátěrových systémů ocelových konstrukcí včetně jejich technologických předpisů
- zajištění stavebního a technického dozoru jako zmocněnce investora v celém rozsahu stavby (technické a majetkoprávní podklady, územní řízení, stavební povolení až po kolaudaci stavby)

Kniha MOSTY



Kontakt

PIS PECHAL, s.r.o.

Lidická 1876/42

602 00 Brno

tel.: +420 513 030 460

e-mail: pis@pechal.cz

www.pechal.cz



VODÁRENSKÁ AKCIOVÁ SPOLEČNOST, a. s., patří k největším provozovatelům vodovodní a kanalizační sítě v České republice. Na rozdíl od ostatních vodárenských společností je ryze českou společností. Díky ní je nepřetržitě dodávána kvalitní pitná voda pro více než půl milionu obyvatel.

VODÁRENSKÁ AKCIOVÁ SPOLEČNOST, a. s., je také významným regionálním zaměstnavatelem, pracuje v ní více jak tisíc zaměstnanců.

Předmětem činnosti VAS jsou :

- výroba a distribuce pitné vody a odvod odpadních vod včetně jejich čištění
- realizace vodovodních a kanalizačních přípojek
- prohlídky a revize kanalizací televizní kamerou
- laboratorní rozbory pitných a odpadních vod
- inženýrská a projektová činnost
- stavebně montážní činnost
- vodárenský dispečink

V loňském roce se **VODÁRENSKÁ AKCIOVÁ SPOLEČNOST, a. s.,** stala nositelkou Národní ceny kvality 2018 v programu START PLUS a získala na dva roky platné mezinárodní ocenění „Committed to Excellence“ a zařazení firmy do mezinárodní databáze nejprestižnějších firem.

ODPADNÍ VODY SE DO PODZEMÍ MORAVSKÉHO KRASU NEDOSTÁVAJÍ DÍKY NOVĚ ZREKONSTRUOVANÉ ČISTÍRNĚ ODPAVNÍCH VOD V JEDOVNICÍCH NA BLANENSKU.



NOVĚ ZREKONSTRUOVANÝ VODOJEM V BABICÍCH NAD SVITAVOU.



Více informací naleznete na www.vodarenska.cz, kde mají zákazníci možnost prostřednictvím zákaznického portálu komunikovat s pracovníky společnosti a vyřídit si své záležitosti elektronicky přes internet.

VÁŠ DODAVATEL
V OBORU DOPRAVNÍHO
A POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

VYROBENO VÍCE NEŽ 50 MILIONŮ PRAŽCŮ
ZA OBDOBÍ SVÉ EXISTENCE



JUNIORSTAV 2021

23. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí
23rd International Conference of Doctoral Students



Vydal

ECON publishing, s.r.o.
Pod Nemocnicí 590/23, 625 00 Brno
e-mail: econ@atlas.cz
tel.: 602 755 541
www.econ.cz

v roce 2021 jako svoji 89. publikaci v systému ISBN.

Vydání první.

Redakce:

Ing. Eva Šuhajdová, Ing. Jana Nováková,
Ing. Kristýna Velikovská, Ing. Světlana Moravčíková
Ing. Michal Kuruc, Ph.D., Ing. Jakub Nosek

Grafické zpracování:

Ing. Petr Kupka

Tisk: FAST VUT

ISBN: 978-80-86433-75-2





JUNIORSTAV 2021

23. ODBORNÁ KONFERENCE DOKTORSKÉHO STUDIA
23RD INTERNATIONAL CONFERENCE OF DOCTORAL STUDENTS

HLAVNÍ POŘADATEL KONFERENCE



GENERÁLNÍ PARTNEŘI KONFERENCE



ISBN 978-80-86433-75-2

