



SLOVAK UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY IN BRATISLAVA
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering

29th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering

October 16th 2019, Bratislava, Slovakia

SPEKTRUM
STU

© Slovak University of Technology in Bratislava,
Faculty of Civil Engineering, 2019

Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave
vo Vydavateľstve SPEKTRUM STU, Mýtina 30, 811 07 Bratislava v roku 2019.
Graficky upravil Andrej Bisták.

Publikácia neprešla korektúrou.

Prvé vydanie
536 strán

ISBN 978-80-227-4972-5

PROLOGUE

Dear Readers:

You have received proceedings containing scientific papers from the conference of PhD. students of the Faculty of Civil Engineering of STU Bratislava, which is annually held under the title “Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering”. The year 2019 was the twenty-ninth year of this PhD. conference.

Creative scientific work is an inherent part of doctoral studies. It can be said that doctoral studies should prepare students for an individual’s scientific work. The mission of science is to unveil unknown rules, arrive at new solutions to problems, or create new original findings, ones that are not known anywhere in the world. However, the mission of science is also to make these new findings available to professionals in other fields, so that these findings can be used for the welfare of all human beings. Therefore, in doctoral studies it is not just theoretical research which is important, but also the acquisition of new scientific facts and the scientific experiment itself. An integral part of doctoral studies is to train and support the ability to define a scientific problem, set scientific goals, and suggest a method for the solution of the problem and prepare an experiment. Students should then be able to analyse their results and reach adequate conclusions. They should also be trained to be able to present their results and defend them before a professional scientific community.

The aim of this conference is to contribute to the acquisition and training of the mentioned skills of PhD. students. The PhD. students present the outcomes of their theses in sections created according to their study fields. As the conference is competitive, the best papers are evaluated and should motivate the doctoral students to engage in more intensive scientific work.

An important condition for high-quality scientific work is an adequate scientific infrastructure along with first-class laboratories and equipment. Recently, a significant investment into laboratories has been realised by STU. Within the University Scientific Park Project, the Faculty of Civil Engineering has been provided with high-quality laboratory equipment and devices. Some laboratories have been refurbished. We believe that the better quality of the Faculty’s research base will be reflected in the better quality of papers presented by our PhD. students. We expect that the creation of a scientific infrastructure will also lead to better scientific work at the Faculty and result in better conditions for the scientific work of our doctoral students. This should give them new incentives and desire to undertake scientific research.

This conference would not be possible without the active participation of the doctoral students, as well as the hard work of the teachers, supervisors, and organisers of the conference, who devoted a lot of their time and energy to it. Our appreciation should also go to the chairmen and members of the boards in the sections and to the experienced professors who, by their advice and comments, guide the further scientific work of PhD. students and, as such, contribute to the better quality of their theses. We would like to thank all those who participated in this conference – the doctoral students, organisers, supervisors, and members of the boards.

Stanislav Unčík
dean

THE LIST OF REVIEWERS

- | | |
|--------------------------------------|--|
| Ing. Gabriel Bálint, PhD. | prof. Ing. Juraj Králik, PhD. |
| prof. Ing. Danka Barloková, PhD. | doc. PhDr. Magdaléna Kvasnicová, PhD. |
| prof. Ing. Juraj Bilčík, PhD. | Ing. Kamil Laco, PhD. |
| doc. Ing. Viktor Borzovič, PhD. | Ing. Kristína Lukáčová, PhD. |
| Ing. Lea Čubanová, PhD. | Ing. Martin Magura, PhD. |
| Ing. Marek Čuhák, PhD. | Ing. Martina Majorošová, PhD. |
| Ing. Jakub Čurpek, PhD. | Ing. Marián Marčíš, PhD. |
| Ing. Michaela Danáčová, PhD. | Ing. Martin Ondrašik, PhD. |
| doc. Ing. Jozef Dický, PhD. | Ing. Martin Orfánus, PhD. |
| Ing. Marek Ďubek, PhD. | Ing. Adela Palková, PhD. |
| Ing. Jana Faixová-Chalachanová, PhD. | Ing. Juraj Papčo, PhD. |
| Ing. Michal Franek, PhD. | doc. Ing. Peter Paulík, PhD. |
| Ing. Tomáš Funtík, PhD. | Ing. Marek Petro, PhD. |
| Ing. Lubomíra Gerhátovej, PhD. | Mgr. art. Ing. Pavol Pilař, ArtD. |
| Mgr. Štefan Gyürki, PhD. | Dr.h.c. prof. Ing. Ján Ravinger, DrSc. |
| prof. Ing. Jaroslav Halvonik, PhD. | Mgr. Tatiana Rückschlossová, PhD. |
| Ing. arch. Martin Hépal, PhD. | Ing. Ján Rumann, PhD. |
| prof. Ing. Kamila Hlavčová, PhD. | Ing. Lukáš Skalík, PhD. |
| Ing. Ivan Hollý, PhD. | Ing. Miloš Slivanský, PhD. |
| Ing. Jaroslav Hrudka, PhD. | prof. Ing. Milan Sokol, PhD. |
| Ing. Rastislav Ingeli, PhD. | doc. Ing. Viera Somorová, PhD. |
| prof. Ing. Juraj Janák, PhD. | Ing. Róbert Sonnenschein, PhD. |
| Ing. Tatjana Janošková, PhD. | doc. Ing. Zuzana Straková, PhD. |
| Ing. Pavol Kajánek, PhD. | Ing. Alena Struhárová, PhD. |
| doc. RNDr. Jana Kalická, PhD. | doc. Ing. Andrej Škrinár, PhD. |
| prof. RNDr. Martin Kalina, PhD. | Ing. Zuzana Štefunková, PhD. |
| prof. Ing. Silvia Kohnová, PhD. | doc. Ing. Magdaléna Štjuberová, PhD. |
| Ing. Michal Kováč, PhD. | Ing. Roman Výleta, PhD. |
| doc. Ing. Michal Krajčík, PhD. | Ing. Lukáš Zelem, PhD. |

THE SCIENTIFIC BOARD

prof. Ing. Ján Brodniansky, PhD.

prof. Ing. Jozef Gašparík, PhD.

prof. Ing. Jozef Hraška, PhD.

prof. Ing. Alojz Kopáčik, PhD.

prof. Ing. Viliam Macura, PhD.

prof. RNDr. Karol Mikula, DrSc.

prof. Ing. Dušan Petráš, PhD.

prof. Ing. Milan Sokol, PhD.

prof. Ing. Ján Szolgay, PhD.

THE COORDINATING BOARD

doc. Ing. Peter Makýš, PhD.

Ing. Antónia Laščeková

Mgr. Ľubica Michalíková

The publication has not been corrected.

CONTENT

Click on the article you want to view

| | |
|------------------------------|---|
| PROLOGUE | 2 |
| The List of Reviewers..... | 3 |
| The Scientific Board..... | 4 |
| The Coordinating Board | 4 |

APPLIED MATHEMATICS

Andrea Ábrahámová

ONE OF THE APPROACHES TO THE CREATION OF CONFORMAL PROJECTIONS13

Dominika Ballová

STATISTICAL ANALYSIS OF THE ACHIEVMENT IN EXAMINATION OF
MATHEMATICS 220

Pavol Jánoš

A NOTE ON THE MCKAY-MILLER-ŠIRÁŇ GRAPHS AS ABELIAN LIFTS OF
MULTIGRAPHS OF DIAMETER TWO25

Adam Šeliga

ASYMETRICKÝ INTEGRÁL VZHLADOM KU KOLEKCIÁM30

APPLIED MECHANICS

Lýdia Moroczová

VZPERNÁ ODOLNOSŤ TLAČENÉHO CFS-PRÚTA POMOCOU DSM.....36

Jakub Rubint

VYUŽITIE OPTICKÝCH ZARIADENÍ PRI MERANÍ ŠÍRKY TRHLÍN V KONŠTRUKCIÁCH
ZAŤAŽENÝCH DYNAMICKÝM ZAŤAŽENÍM.....42

Matúš Turis

PLASTICKÁ ZÓNA MALÉHO ROZSAHU V OKOLÍ TRHLINY.....48

Lenka Uhlířová

SPEKTRÁLNA ANALÝZA PRAVOUHLEJ ODKAĽOVACEJ NÁDRŽE54

BUILDING TECHNOLOGY

Bader Alamro

VYŠŠIE FORMY MANAŽÉRSTVA KVALITY V STAVEBNEJ FIRME.....61

Barbora Belániová

POZOROVANIE PODMIENOK ROZVOJA BIKORÓZIE V KONŠTRUKCII „DOUBLE ETICS“ POMOCOOU EXPERIMENTÁLNEHO SKÚŠANIA67

Diana Bladová

ŠPECIFIKÁCIA A ANALÝZA 3D TLAČE73

Katarína E. Hellová

POROVNANIE SKLADIEB MUROVANÝCH OBVODOVÝCH KONŠTRUKCIÍ S DODATOČNÝM ZATEPLENÍM ETICS.....79

Radovan Majer

METÓDY KALKULOVANIA UŠLÉHO ZISKU V STAVEBNEJ ZÁKAZKE.....86

Pavol Mayer

ANALÝZA MOŽNOSTÍ VYUŽITIA BIM A BEZDRÔTOVÝCH SENZOROV NA ÚČELY BOZP.....93

Patrik Šťastný

ANALÝZA VYBRANÝCH TECHNOLOGIÍ DODATOČNEJ PROTIVLHKOSTNEJ IZOLÁCIE HISTORICKÝCH KONŠTRUKCIÍ99

GEODESY AND CARTOGRAPHY

Richard Czikhardt

PERFORMANCE ASSESSMENT OF FIRST GNSS-COLLOCATED ARTIFICIAL SAR REFLECTOR IN SLOVAKIA 106

Richard Honti

SEGMENTÁCIA VYBRANÝCH GEOMETRICKÝCH ÚTVAROV Z MRAČIEN BODOV.... 114

Radoslav Choleva

OVEROVANIE MERACIEHO VÝKONU LASER TRACKERA..... 123

Martin Leško

APPLICATION OF THE PERSISTENT SCATTERER INTERFEROMETRY SYNTHETIC APERTURE RADAR (PSInSAR) AND SMALL BASELINE SUBSET (SBAS) FOR MONITORING TERRAIN CHANGES IN UPPER NITRA REGION..... 130

Daniela Piačková

COMPUTATION OF THE TOPOGRAPHIC GRAVITATIONAL POTENTIAL OF ASTEROID (101955) BENNU IN TERMS OF THE SPHERICAL HARMONICS 139

Filip Pružinec

VOXEL-BASED SOLAR ILLUMINATION COMPUTATION OF FOREST REPRESENTED BY POINT CLOUD DATA..... 146

LANDSCAPING

František Cyprich

VYUŽITIE GRIDOVÝCH DATABÁZ PRI VODOHOSPODÁRSKYCH VÝPOČTOCH..... 153

Gréta Doláková

MODELOVANIE KVALITY AKVATICKÉHO HABITATU 160

Zuzana Németová

CALIBRATION PROCEDURE OF THE PHYSICALLY-BASED EROSION-2D MODEL
UNDER RAINFALL SIMULATIONS IN THE CZECH REPUBLIC..... 167

Viera Rattayová

ANALÝZA NEISTÔT V PARAMETROCH CN METÓDY A ICH VPLYV NA VÝSLEDNÉ
HODNOTY KULMINAČNÝCH PRIETOKOV NA VYBRANÝCH POVODIACH V
MYJAVSKOM REGIÓNE..... 176

Veronika Soldánová

VODOHOSPODÁRSKA BILANCIA NÁDRŽE PRI NEMERANÝCH PRIETOKOCH 182

Barbora Vaseková

MOŽNOSTI ZAMEDZENIA NEGATÍVNEHO VPLYVU DRUHU *FALLOPIA JAPONICA*
NA BREHOVÚ VEGETÁCIU 189

THEORY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY OF BUILDINGS

Mária Frťalová

CHLADENIE PROCESOM ODPAROVANIA V HALOVÝCH OBJEKTOCH 196

Soňa Gažíková

VYUŽITIE OTVORENÉHO GEOTERMÁLNEHO SYSTÉMU PRE CENTRALIZOVANÉ
ZÁSOBOVANIE TEPLOM NA SLOVENSKU 202

Veronika Gombošová

VYUŽITIE GARANTOVANEJ ENERGETICKEJ SLUŽBY V PRAXI..... 210

Dominika Juhošová

HYGIENA PITNEJ VODY Z HLADISKA PRIPÁJACÍCH POTRUBÍ VODOVODU 217

Matej Kubica

PRÍPRAVA MERANÍ NA KONŠTRUKČNÝCH MODELOCH KOMPAKTNEJ STANICE
TEPLA S POUŽITÍM OBNOVITELNÝCH ZDROJOV ENERGIE..... 225

Lucia Kudiváni

MOŽNOSTI ENRGETICKÉHO HODNOTENIA BUDOVY VYTVORENEJ V BIM 232

Imrich Sánka

INDOOR ENVIRONMENTAL QUALITY EVALUATION IN A NZEB WITH HEAT
RECOVERY AND WARM AIR HEATING SYSTEM..... 239

THEORY AND STRUCTURES OF BUILDINGS

Matthias Marcel Jean Arnould

POTENCIÁL CIRKULÁRNEJ EKONOMIKY V ARCHITEKTÚRE 21. STOROČIA 250

Adam Blažo

APLIKÁCIA VÁKUOVÉHO ZASKLENIA NA RÔZNYCH PROFILOVÝCH RIEŠENIACH
DREVENÝCH OKIEN – POROVNANIE VNÚTORNÝCH POVRCHOVÝCH TEPLÔT 256

Jozef Bočkaj

KALIBRÁCIA MERACIEHO ZARIADENIA MINI CTA V AERODYNAMICKOM TUNELI
STU NA TRNÁVKE V BRATISLAVE..... 263

Samuel Cruz

MODELOVANIE POVRCHOVEJ DRSNOSTI OBALOVÉHO PLÁŠŤA BUDOV V CFD
SIMULÁCIACH A VETERNOM TUNELI 271

Mário Chlaň

VYUŽITIE BIM PRI ŽIVOTNOM CYKLE BUDOVY..... 279

Josip Klem

PRÚDENIE VZDUCHU A VZOSTUP TEPLoty V DVOJITEJ TRANSPARENTNEJ
FASÁDE MECHANICKY VETRANEJ POMOCO U REKUPERAČNEJ JEDNOTKY 286

Veronika Klincová

KLIMATICKÉ ZMENY 293

Jozef Kováč

MECHANICKÉ VLASTNOSTI FÓLIOVÝCH POVLAKOVÝCH HYDROIZOLAČNÝCH
MATERIÁLOV NA BÁZE MPVC..... 301

Barbora Kráľová

PREHLAD UDRŽATEĽNÝCH TEPELNOIZOLAČNÝCH MATERIÁLOV BUDOV 310

Silvia Križanová

APLIKÁCIA PASÍVNYCH SMART ZASKLENÍ V OBYTNÝCH BUDOVÁCH - OKNO S
ADAPTÍVNÝM TERMO-CHROMOMICKÝM ZASKLENÍM..... 316

Roman Ruhig

ALTERNATÍVNE INTEGROVANIE ENERGETICKY EFEKTÍVNEHO MEDZIPRIESTORU
V KONŠTRUKČNOM SYSTÉMU PANELOVÉHO DOMU ZTB-13B..... 325

Ema Ruhigová, Jana Gregorová

VYKUROVANIE V MEŠTIANSKOM DOME - VSTUPNÉ PARAMETRE
A VÝCHODISKÁ 333

Richard Šimek, Vojtech Chmelík, Monika Rychtáriková

STANOVENIE HLADINY HLUKU POZADIA VO VEĽKÝCH ÁTRIÁCH SO ZNÁMYMI
AKUSTICKÝMI VLASTNOSŤAMI A FUNKCIOU MIESTNOSTI 339

Alexander Topilin

SPÔSOBY REDUKCIE EFEKTU MESTSKÉHO TEPLOTNÉHO OSTROVA 346

Simon Vacek

PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA APLIKÁCIE KAPILÁRNE AKTÍVNYCH TEPELNÝCH IZOLÁCIÍ AKO VNÚTORNÉHO ZATEPLENIA PRE HISTORICKÉ OBJEKTY 353

Lukáš Vargic, Monika Rychtáriková, Jana Gregorová

AKUSTICKÉ VLASTNOSTI TEPELNE IZOLOVANÝCH OBVODOVÝCH MURÍV HISTORICKÝCH BUDOV 361

THEORY AND STRUCTURES OF CIVIL ENGINEERING WORKS

Mária Bolešová

ÚČINNOSŤ NÁVRHU LOKÁLNE PODOPRETÝCH STROPNÝCH DOSIEK NA ZVÝŠENIE ŠMYKOVEJ ODOLNOSTI..... 368

Marek Braniš

DOPRAVNÉ PRIESKUMY ZAMERANÉ NA VEREJNÚ HROMADNÚ DOPRAVU 376

Jakub Dobrý

POROVNANIE VÝSLEDKOV MERANÍ DEFORMÁCIÍ EXPERIMENTÁLNE OVEROVANÝCH STĽPOV 386

Peter Havlíček

ŠMYKOVÁ ODOLNOSŤ BETÓNOVÉHO ROZHRAVIA – REŠERŠ ODBORNEJ LITERATÚRY 392

Ludmila Kormošová

VPLYV OTVOROV V BLÍZKOSTI STĽPA NA BEZPEČNOSŤ MODELOV EUROKÓDU NA PREDIKCIU ŠMYKOVEJ ODOLNOSTI LOKÁLNE PODOPRETÝCH DOSIEK..... 397

Miroslav Kováčik

DLHODOBÉ VLASTNOSTI GFRP VÝSTUŽE POUŽITÝCH V BETÓNOVÝCH NOSNÝCH PRVKOCH..... 405

Eliška Kučová

ODVODENIE RELATÍVNEJ ULAHNUTOSTI HRUBOZRNÝCH ZEMÍN Z VÝSLEDKOV DYNAMICKEJ PENETRAČNEJ SKÚŠKY 411

Matúš Neusch

POLOTUHÉ PRÍPOJE V DREVENÝCH KONŠTRUKCIÁCH S VYUŽITÍM ALUMIDI KONZOL..... 417

Lucia Ondrušková

BODOVÉ UCHYTENIA V NOSNÝCH SYSTÉMOCH PRESKLENÝCH FASÁD 422

Adam Petřík

SPRIAHOVACIE LIŠTY S OTVORMI AKO SPOLAHLIVÝ SPRIAHOVACÍ PROSTRIEDOK V STAVEBNÍCTVE 428

Anton Sivčák

BETÓNOVÉ DOSKY S NEKOVOVOU VÝSTUŽOU SPRIAHNUTÉ S NADBETÓNOVANOU MOSTOVKOVOU DOSKOU 434

Simona Sarvaicová

ANALÝZA ŠMYKOVÉHO TOKU V OBLASTI OKOLO VNÚTORNÝCH STĹPOV A
OKRAJOV STIEN..... 440

Róbert Štecák

BRIDGE WEIGH-IN-MOTION SYSTÉM 448

Aleksandar Vidaković

TEORETICKÁ ANALÝZA DISTRIBÚCIE PRIEČNEHO ZAŤAŽENIA A SPOLUPÔSOBIACA
ŠÍRKA V KONZOLOVÝCH DOSKÁCH..... 455

WATER RESOURCES ENGINEERING

Adam Brziak

ANALÝZA VÝSKYTU A TRVANIA SNEHOVEJ POKRÝVKY NA VYBRANÝCH
RAKÚSKYCH POVODIACH..... 462

Daniel Buček

POSÚDENIE MORFOLOGICKEJ STABILITY REVITALIZÁCIE
MEANDRUJÚCEHO TOKU..... 467

Lucia Bytčanková

VPLYV TVAROV VTOKOVÉHO OBJEKTU NA SÚBEŽNÝ CHOD TURBÍN
PRIHAŤOVEJ MVE 473

Réka Csicsaiová

HYDRAULICKÉ POSÚDENIE KANALIZAČNÉHO ZBERAČA..... 479

Michaela Červeňanská

ŠTÚDIA VODOZÁDRŽNÝCH OPATRENÍ NA ÚZEMÍ MESTA TRNAVA 485

Mária Ďurigová

DETEKCIA BODOV ZLOMU V PRIEMERNÝCH MESAČNÝCH PRIETOKOCH NA
SLOVENSKU..... 491

Gabriel Földes

VYUŽITIE KLIMATICKÉHO SCENÁRA CLM PRI URČENÍ BUDÚCICH NÁVRHOVÝCH
HODNOTÁCH INTENZÍT KRÁTKODOBÝCH DAŽĎOV V KLIMATOLOGICKEJ
STANICI LIPTOVSKÁ TEPLIČKA 497

Anita Keszeliová

ZMENY ÚHRNNÉHO VÝPARU VO VYBRANÝCH POVODIACH SR..... 503

Martin Kubáň

SIMULÁCIA VLHKOSTI PÔDY NA VYBRANÝCH RAKÚSKYCH POVODIACH S
KONCEPČNÝM SEMI-DISTRIBUOVANÝM ZRÁŽKOVO ODTOKOVÝM
MODELOM TUW 509

Marija Mihaela Labat

VPLYV ZMENY VYUŽITIA ÚZEMIA A KLIMATICKÝCH ZMIEN NA ODTOK V MALOM
HORSKOM POVODÍ..... 515

Ivana Marko

ANALÝZA KVALITATIVNÝCH PARAMETROV DAŽĎOVÉHO ODTOKU Z
URBANIZOVANÉHO ÚZEMIA..... 521

Michal Marton

ADSORPCIA MIKROPOLUTANTOV NA GRANULOVANOM AKTÍVNOM UHLÍ 527

Zinaw Dingetu Shenga

MODELLING GROUNDWATER FLOW WITH SURFACE WATER INTERACTION..... 531

APPLIED MATHEMATICS

*Andrea Ábrahánová*¹

Study: Applied Mathematics, 2nd year of study

ONE OF THE APPROACHES TO THE CREATION OF CONFORMAL PROJECTIONS

JEDEN Z PRÍSTUPOV K TVORBE KONFORMNÝCH ZOBRAZENÍ

Abstract

Choice of cartographic projection largely depends on different factors. In this paper we start from the requirement for conformity of projections. Conformal projections are defined as projections with zero angular distortion and these are the most frequently applied map projections in coordinate systems. Conformal projections also use the complex function theory. The projection plane can well be interpreted by complex plane. The paper shows the description and creation of three conformal projections, specifically the stereographic, the Lagrange's and the August's cartographic projections. It is proven, that from the stereographic projection by complex numbers is possible to derive other projections, while the conditions of conformity are adhered.

Key words

conformal projection; complex numbers; isometric coordinates; stereographic; Lagrange; August

1. Introduction

The problem of map projections has been discussed from the time of ancient Greek scientists, who probably first create cartographic projections. Most of widely used projections date from the 16th to 19th centuries, but some types have been developed during the 20th century. [4]

In the classification of cartographic projections, it is necessary to respect some criteria: distortions, projection plane and position of the plane. According to the characteristics of cartographic distortions the projections can be divided to three groups: equidistant, equal - area and conformal, where the angles are preserved. [4]

The aim of this paper is point out the conditions of conformity and their continuity, and applications in the cartographic projections: stereographic projection, August's epicycloidal conformal projection and Lagrange's conformal circular projection.

2. Conformal cartographic projections

Cartographic projections can be defined as a mathematical transformation of a reference surface of an ellipsoid or a sphere onto a plane. A point on the surface is referenced by its latitude φ and longitude λ , or by isometric coordinates q and λ , where q for the sphere and for the ellipsoid is:

$$q_s = \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right); \quad q_e = \ln \operatorname{tg} \left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \sqrt{\frac{1 - e \sin \varphi}{1 + e \sin \varphi}} \right]. \quad (1)$$

¹Ing. Andrea Ábrahánová, Departement of Mathematics and Descriptive Geometry, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Conformal projections are the most frequently applied map projections in coordinate systems. For the complex variable $z = x + iy$ the map equations of a conformal projection for isometric coordinates q, λ have to satisfy the following conditions and their differentials [5]:

$$\begin{aligned} x + iy &= f(q + i\lambda) & \text{and} & & dx + idy &= f'(q + i\lambda)(dq + id\lambda), \\ x - iy &= f(q - i\lambda) & \text{and} & & dx - idy &= f'(q - i\lambda)(dq - id\lambda). \end{aligned} \quad (2)$$

If the scale distortion factor is dependent only on isometric coordinates and is independent on the azimuth of the geodesic line, then the given projection is conformal. Provided the equation and its differentiating (2) the scale distortion factor can be expressed:

$$m^2 = N^2 \cos^2 \varphi = \frac{(dx+dy)(dx-dy)}{N^2 \cos^2 \varphi (dq+d\lambda)(dq-d\lambda)} \Rightarrow m^2 = \frac{f'(q+i\lambda)f'(q-i\lambda)}{N^2 \cos^2 \varphi}. \quad (3)$$

On the right side of the equation (3) are only isometric coordinates, the only factors, which perform in the formula. The scale distortion factor is dependent only on isometric latitude q and longitude λ and is independent on azimuth. It follows, that cartographic projection is conformal. [6]

2.1 Conformal cartographic projections with Cauchy – Riemann equations

In complex function theory the criterion for the conformity of a map projection is the basis for the definition of analytical functions. It is shown that an analytic function of the complex variable z

$$f(z) = f(x + iy) = u(x, y) + iv(x, y) \quad (4)$$

holds the Cauchy – Riemann equations:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x}. \quad (5)$$

In cartography it means, that if a conformal projection is given with formulas of Cartesian coordinates x, y , will be conformal if, and only if, when holds the equation (5).[3] But these conditions are not applicable to the projections, where the given orthogonal coordinates are as functions of spherical coordinates φ and λ . The condition (5) is restrictive, the results are not clearly determined, so it means, it is necessary to make the conditions applicable to a projection defined as functions of the spherical coordinates. If the map equations $x(q, \lambda)$ and $y(q, \lambda)$ are expressed as functions of the isometric variables and satisfy the Cauchy – Riemann equations, the projection will be conformal:

$$\frac{\partial x}{\partial \lambda} = \frac{\partial y}{\partial q}; \quad \frac{\partial x}{\partial q} = -\frac{\partial y}{\partial \lambda}. \quad (6)$$

When we want to make sure, that a projection is in fact conformal, we have to test a set of Cauchy – Riemann conditions as functions of spherical coordinates. [3]

3. World maps in the conformal projections

Functions over the complex numbers are an inexhaustible source of conformal mappings, since functions are extended to complex numbers in the form that permits them to be differentiable over the complex plane. Many useful conformal maps have been found using complex numbers. [7]

Many conformal projections can be derived from each other. An example of three to each other connected projections we can mention those projections mentioned above in Chapter 1.

3.1 The stereographic projection

The stereographic projection of the sphere to the plane appears in many areas of mathematics and its applications, it finds use in fields like complex analysis, cartography, geology, and photography. The author of the stereographic projection was Hipparchus and it was known to ancient Greeks and probably to the Egyptians. The first mathematical proof about the conformity of this map was first published in 17th century. This projection is conformal and is of fundamental importance in complex function theory. For the transversal aspect of stereographic projection, with the perspective center on the Equator and the plane of projection is parallel to the polar axis, these equations are:

$$x = \frac{\sin\varphi}{1+\cos\lambda\cos\varphi}; \quad y = \frac{\sin\lambda\cos\varphi}{1+\cos\lambda\cos\varphi}; \quad (7)$$

where x, y are components of the complex number z ; λ and φ are spherical coordinates of the points. These equations served as a basis for many creators of conformal map projections. We can prove that two more projections were casually connected to this projection. [3]

3.2 The Lagrange's cartographic projection

From the form of the equations (7) it is possible to derive the equations of the Lagrange's conformal circular projection. The mentioned stereographic projection was used as the basis for a map in the Lagrange's circular projection, so it can be said; this projection is generalization of the stereographic transversal projection. The meridians λ are relabeled as $n\lambda$, where n is any positive number. [3]

Our goal is to determine a corresponding transformation φ^* on φ to formulate a conformal projection. This function φ^* such as the equation (7) must satisfy the Cauchy - Riemann equations (5).

Lagrange shows the validity of the Cauchy – Riemann conditions for the substitution of spherical coordinates φ, λ :

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{n}. \quad (8)$$

After the differentiating the equations with respect to λ and φ and after their equating we have the necessary conditions to be satisfied for conformity:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\varphi^*} = n\cos\varphi, \quad (9)$$

where φ^* is independent of λ .

The condition for conformity is the ordinary differential equation and its solution:

$$d\varphi^* = \frac{1}{n\cos\varphi}d\varphi \Rightarrow \varphi^* = \frac{1}{n} \int \frac{1}{\cos\varphi}d\varphi = \frac{1}{n} \ln \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right). \quad (10)$$

After the substitution of the isometric latitude q from (1) to (10) we shall write:

$$\varphi^* = \frac{q}{n}. \quad (11)$$

From (11) and (8) we have by substitution in (7) the set of Cauchy – Riemann conditions as functions of spherical coordinates q and λ :

$$\frac{\partial x}{\partial \lambda} = \frac{\partial y}{\partial \varphi} \cos \varphi; \quad \frac{\partial x}{\partial \varphi} \cos \varphi = -\frac{\partial y}{\partial \lambda}. \quad (12)$$

In cartography, map equations are generally expressed as functions of spherical coordinates, and the formulas (12) are applicable as a test for conformity of the transformation. [3]

The result of these substitutions into the original equations of the stereographic formula (7) gives the final equations of Lagrange’s cartographic projection for all values of n :

$$x = \frac{\sin(\frac{\lambda}{n})}{\cosh(\frac{q}{n}) + \cosh(\frac{\lambda}{n})}; \quad y = \frac{\sinh(\frac{q}{n})}{\cosh(\frac{q}{n}) + \cosh(\frac{\lambda}{n})}. \quad (13)$$

As we can see, on the right side of the equation (15) are only the isometric coordinates, which provide the conformity in the mentioned Lagrange’s projection (Figure 1).

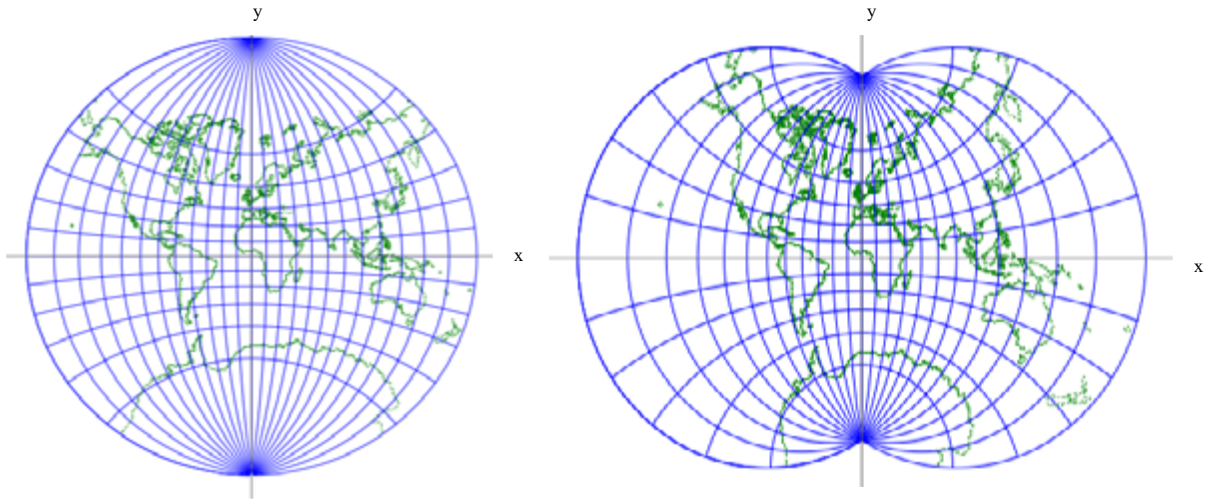


Figure 1: The Lagrange’s circular cartographic projection for $n = 2$ and for $n = \pi/2$

3.3 The August’s cartographic projection

The map equations are developed for the August’s epicycloidal conformal projection (Figure 2) and for the Lagrange’s family of conformal projections from the stereographic projection. The creator of two – cusped epicycloidal projection is Friedrich W. O. August, who was a German professor of mathematics. The main idea that he followed to the discovery of this type of projection, comes from his friend, Dr. G. Bellermann in Berlin, who has for some time been concerned with the idea of creating a conformal projection of a reference sphere inside an epicycloid. [1]

In the August’s projection we come out from the parametric equations of the epicycloid:

$$x = (r + r')\cos\theta + d\cos\frac{r+r'}{r}\theta; \quad y = (r + r')\sin\theta + d\sin\frac{r+r'}{r}\theta, \quad (14)$$

where r is radius of epicycle, r' is radius of the fixed circle and d is the distance of the point from the center of the epicycle. In the case of two – cusped epicycloid the ratio of the radius of the epicycle and the circle is 2:1. From this ratio then results a function, that is extended to complex numbers in a way, that allows to create an additional conformal projection.

If we interpret the Lagrange’s projection as the unit circle, then we can map all of the points into the plane bounded by the epicycloid. The unit circle is conformally mapped to the inside of the

epicycloid, that forms the boundary of the map using complex numbers. The coordinates of the point U , which is on the boundary of the epicycloid (Figure 2), are:

$$x_u = \frac{3}{2}\cos\theta + \frac{1}{2}\cos3\theta; \quad y_u = \frac{3}{2}\sin\theta + \frac{1}{2}\sin3\theta. \quad (15)$$

The projection plane we can interpret by the complex plane, then the complex value u of point U is $x_u + iy_u$, and then it holds:

$$u = \frac{3}{2}(\cos\theta + i\sin\theta) + \frac{1}{2}(\cos3\theta + i\sin3\theta). \quad (16)$$

After the using De Moivre's theorem the formula (16) can be written in the form:

$$u = \frac{1}{2}(3e^{i\theta} + e^{3i\theta}). \quad (17)$$

After the substitution of the complex value $p = e^{i\theta}$ of the point P on the circle, we get the functional relation between the points on the unit circle and of the epicycloid:

$$u = \frac{1}{2}(3p + p^3). \quad (18)$$

Function u is an analytic function of p , i.e. the transformation (18) satisfies the Cauchy – Riemann conditions and August's projection is conformal, like the Lagrange's projection. The relation between Lagrange's and August's projection is expressed as follows (19) or by the using the binomial theorem (20):

$$X + iY = \frac{1}{2}[3(x + iy) + (x + iy)^3], \quad (19)$$

$$X + iY = \frac{x}{2}(3 + x^2 - 3y^2) + i\frac{y}{2}(3 + 3x^2 - y^2), \quad (20)$$

where x and y are the coordinates of the Lagrange's projection. [3]

The final map equations can be written as functions of Lagrange's cartographic projection with $n = 2$:

$$X = \frac{x}{2}(3 + 3x^2 - y^2); \quad Y = \frac{y}{2}(3 + x^2 - 3y^2). \quad (21)$$

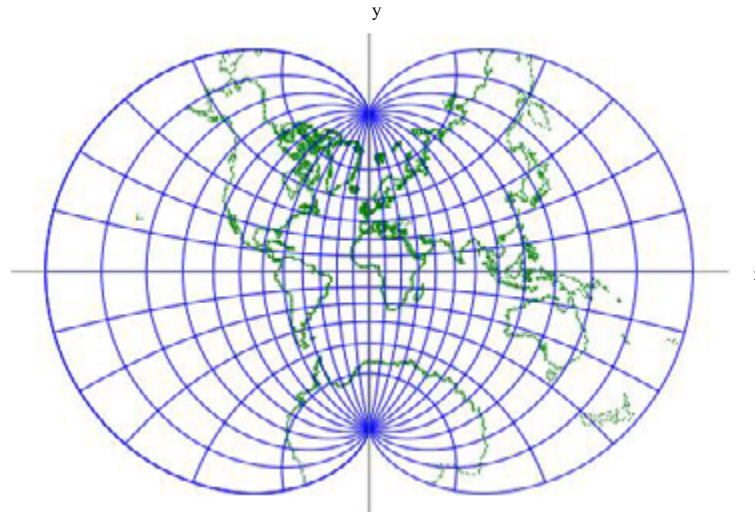


Figure 2: The August's two-cusped epicycloidal projection

3.4 Variations of August's epicycloidal projection

When we are working with complex numbers, we have innumerable variability of projections. In the Lagrange's projection the function (18) is placed on the complex plane, so that the North Pole is at $p = 1$ and South Pole is at $p = -1$; these points are the inflection points of the function. The inflection points for complex arguments are important, because the cusps could wrap around for other functions. The function (20) is used to map the Lagrange's projection to August's projection on a two – cusped epicycloid. [7]

As one of the variations of August's epicycloidal projection can be mentioned a projection based on the function:

$$u = \frac{1}{4}(5p + p^5). \quad (25)$$

After the using of the binomial theorem we get:

$$x = \frac{x}{4}(5 - x^4 + 10x^2y^2 - 5y^4); \quad y = \frac{y}{4}(5 - 5x^4 + 10x^2y^2 - y^4), \quad (26)$$

where x and y are the coordinates of the Lagrange's projection.

This function instead of on (16) produce cuspidal points of the right shape at the poles, but also produces two extra cusps on the Equator (Figure 3 left). In this case the ratio of the radius of the epicycle and the circle is 4:1.

When the ratio of the epicycle and the circle is 6:1, we get a six – cuspidal epicycloidal projection (Figure 3 right).

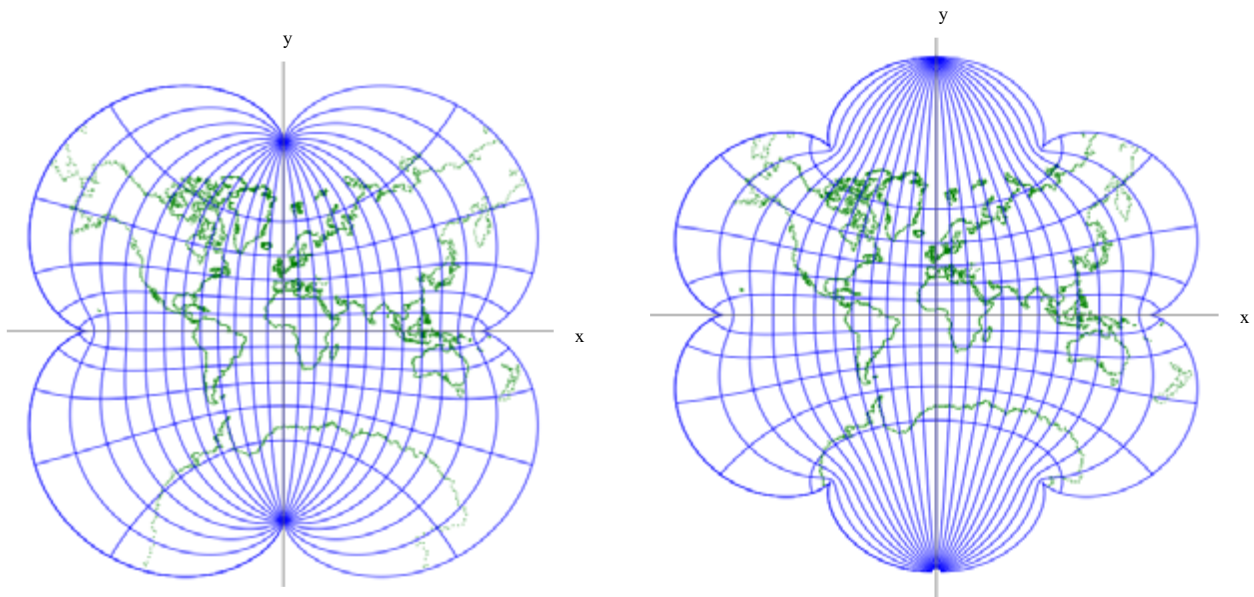


Figure 3: Four –cusped and six-cusped variants of August's epicycloidal projection

4. Other approach to creation of conformal projections using complex numbers

The theory of conformal mapping with the using of complex numbers is also used in other map projections.

As a base of these projections is used the general shape of the map equations for the conformal mapping (2), where the right side of the equation is developed into the Taylor series [6], [2]:

$$x + iy = f(q) + f'(q) \cdot i\lambda + f''(q) \cdot \frac{(i\lambda)^2}{2!} + f'''(q) \cdot \frac{(i\lambda)^3}{3!} + f^{IV}(q) \cdot \frac{(i\lambda)^4}{4!} + \dots, \quad (27)$$

where λ is reduced to the preserved meridian and $f(q) = Md\varphi$.

The formulas (27) are the general equations for conformal mapping, because the function $f(q)$ can be arbitrarily chosen.

Conclusions and future work

The mentioned cartographic projections are an interesting way to illustrate, what the mathematics of conformal projections is capable of. The mathematics of conformal projections is using the theory of complex numbers and on this basis we can derive different map equations. Some projections are not of practical utility, but it can be an opportunity to gain insight into what is actually demanded of map projections. [7]

We would also like to address projections with different approach and their map equations, which can be derived from the Taylor series.

Acknowledgements

The paper was supported by grant from Grant Agency VEGA no. 1/0682/16.

References

- [1] AUGUST, F.: Concerning a Conformal Map of the Earth on the Epicycloidal Projection. *Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin*. 1874, Volume 9, p. 1-22. ISSN 1614-2055 [in German]
- [2] HOJOVEC, V et al.: *Cartography*. Praha : Institute of Geodesy and Cartography, 1987. 660 p. ISBN 29-621-87. [in Czech]
- [3] SCHMID, E.: *World Maps on the August Epicycloidal Conformal Projection* : Technical Report NOS 63, Rockville: NOAA, 1974. 22 p.
- [4] SYNDER, J.P.: *Map projections used by the U.S. Geological Survey*. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office Washington D.C., 1982. 313 p. Supt. of Docs. no.: I 19.3:1532.
- [5] SZATMÁRI, D. – VAJSÁBLOVÁ, M. and MOJŠOVÁ, D.: Application of Evaluation Criteria to Cartographic Projections. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2017, Volume 14, Issue Number 5, p. 11-27. ISSN 1785-8860.
- [6] VAJSÁBLOVÁ, M.: *Mathematical Cartography*. Bratislava: Slovak University of Technology, 2013. 315 p. ISBN 978-80-227-4027-2. [in Slovak]
- [7] <http://www.quadibloc.com/maps/mcf0702.htm> [visited 5.8.2019]

Dominika Ballová¹

Študijný program: Aplikovaná matematika, ročník: 3.

STATISTICAL ANALYSIS OF THE ACHIEVMENT IN EXAMINATION OF MATHEMATICS 2

Abstract

Civil engineering is a field where (applied) mathematics frequently occurs. For this reason we evaluated the achievement of students during the first year of their studies. In this paper we used several statistical tools to analyse and describe the results of the examination of the subject Mathematics 2. The core of this subject is to deal with integrals and their application. Integrals are often applied in the field like statics, heat balance, viscoelasticity, streaming, enthalpy, entropy and many more.

Key words

Kruskal-Wallis test, Dunn test, dependence, mosaic plot.

1. Introduction

Studying civil engineering requires among others also great level of knowledge of Mathematics. In this paper we focused on the students achievement at Mathematics 2, where the aim is to deal with integrals and their applications. Our goal was to describe the total achievement of the students, to determine which topics cause the biggest problems and on the other hand in which topics students was able to improve on. We were also interested in the dependence between number of terms and the final grade of the student.

2. Statistical methods

In this paper we used graphical and analytical statistical methods to evaluate the results of the exam of Mathematics 2.

Kruskal-Wallis test is the non-parametric analogue to one-way ANOVA. Let assume that we have k independent samples from continuous distribution with ranges n_1, n_2, \dots, n_k . The null and alternative hypothesis of this test is given:

H_0 : All the k samples follow the same distribution.

H_1 : At least two samples follow different distributions.

Let assign $n = n_1 + n_2 + \dots + n_k$. Then all the n observations are organized into a nondecreasing sequence and the order of each observation is assigned. We assign T_i the sum of orders of the i -th sample. The test statistic is then given:

$$K = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n_i} - 3(n+1),$$

¹ Mgr., Radlinského 11, 810 05 Bratislava

which under the state of the null hypothesis follows χ^2 distribution with $(k - 1)$ degrees of freedom.[1]

After rejecting the null hypothesis at the significance level α we seek to find which samples differ statistically significantly. For this purpose Dunn test can be used.

Dunn test is a tool to determine pairs of statistically significantly different samples. The hypothesis are given:

H_0 : The i -th and j -th sample follows the same distribution.

H_1 : The i -th and j -th sample does not follow the same distribution.

The test statistic is given in the following form:

$$D = |\bar{T}_i - \bar{T}_j|.$$

The null hypothesis is rejected, if

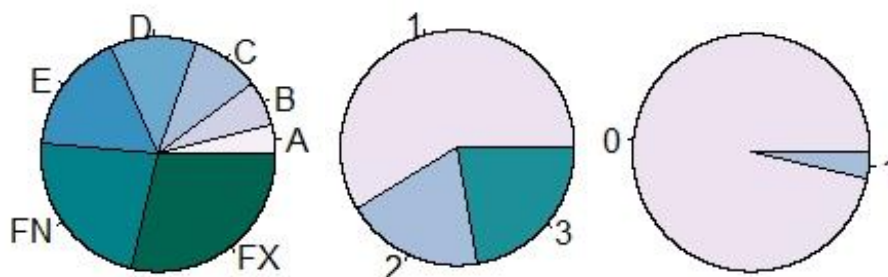
$$D > \sqrt{\chi_{\alpha}^2(k-1) \frac{n(n+1)}{12} \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)},$$

where $\chi_{\alpha}^2(k-1)$ is the critical value of the χ^2 distribution with $(k - 1)$ degrees of freedom; and there is a statistically significant difference between the samples at the significance level α . [2]

3. Evaluation

The data was collected after the end of the summer exam period. The examination was based on a written exam and in case of a tie an oral examination was carried out. The written part of the examination was consisted of five tasks, as follows: the first task was to solve an integral. A maximum of seven points could be earned in case of a successful solution. The aim of the second task was to compute the area between curves, i.e. the application of a definite integral. This task was evaluated by a maximum of eight points. In the third task the students solved the differential equation and were able to obtain a total of eleven points. Maximum of thirteen points was awarded for the fourth task, which was to solve a plane contact problem and finding the normal line at a chosen point. The last task was devoted to identification of extremes of a function of several variables and it was possible to get 12 points in total. For our purpose we collected the score for each task at each term. Other variable of interest was the score gained during the semester, the final rate and the corresponding total score, a factor variable containing the information about the oral examination, whether it was necessary and if it was successful and at last we had one unexpected binary variable representing if the student was get caught cheating during the exam. We were also interested in the number of exams each student has attended.

First in *Figure 1* we are displaying pie charts to better understand the proportion of the sample. We can see that about half of the students passed the subject (A-E) and quarter of them did not even try to pass (FN). More than half of the students who passed the exam did so on the first term. We can see that significant number of the students did not needed the oral examination (N). In case of an oral examination the outcome was mostly the better grade (1).



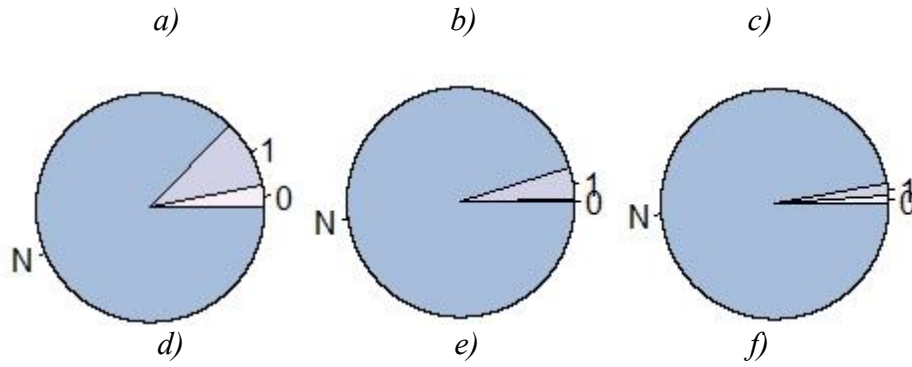
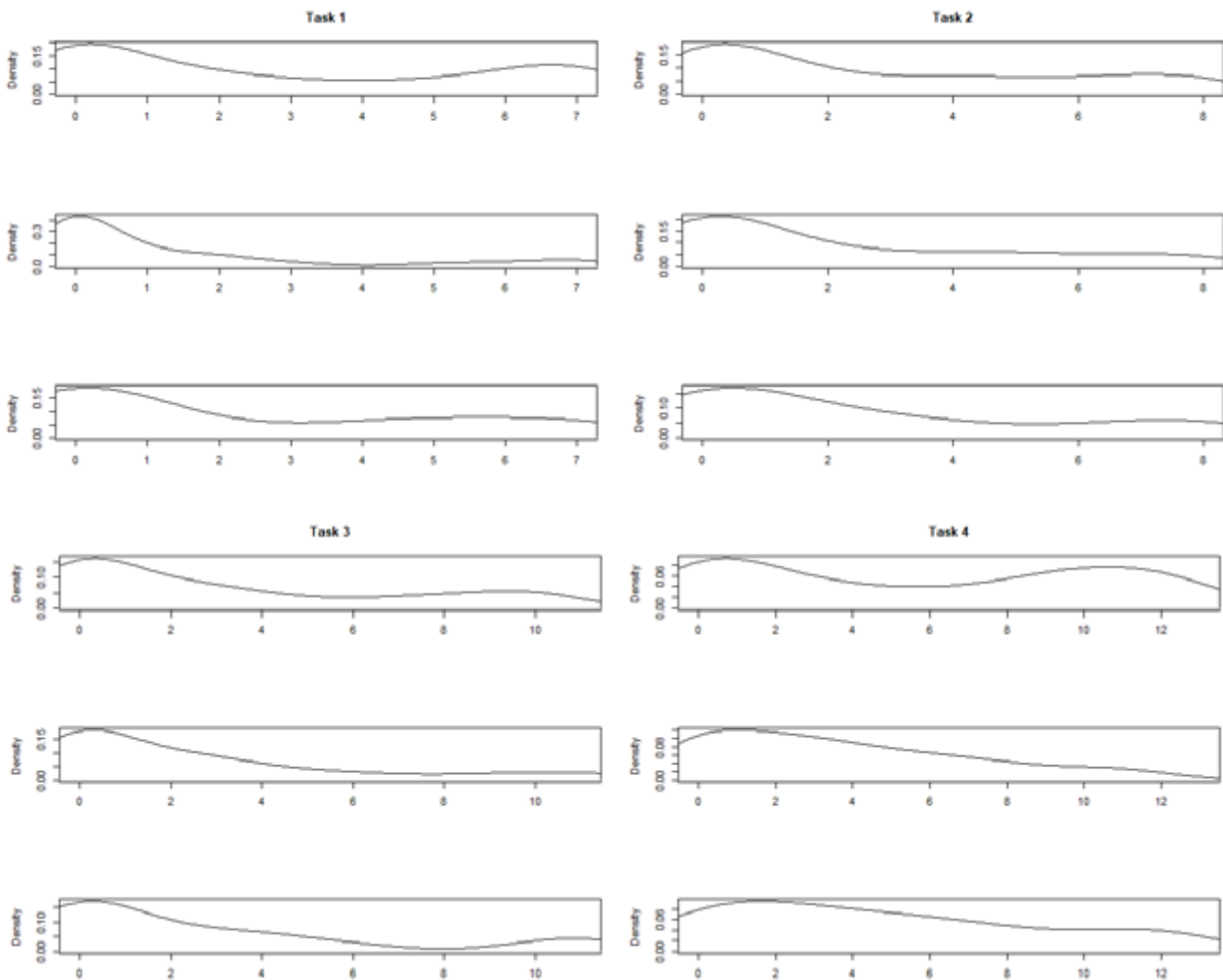


Figure 1: Pie chart of a) grades b) number of attended exams to get the grade c) cheating
d) oral examination first term e) oral examination second term f) oral examination third term

Next we tried to better understand how the performance of students who attended more than one term changes from term to term. We also tried to describe which type of the tasks are the hardest for the students respectively in which they were able to improve on from term to term the best. In *Figure 2* we can see each task at each of the three terms and the corresponding density function. It occurs that the differential equation is the one which is the hardest for students. The best improvement was in the solution of the fourth and fifth tasks.



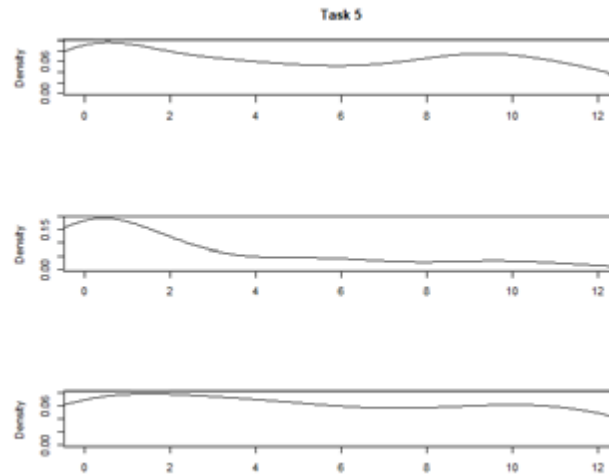


Figure 2: Density plots for each task at each term

Next we compared analytically the results of each task from term to term. Since the data follows non normal distribution we used non parametric testing. For testing the significance of improvement in each task individually we used Kruskal Wallis test followed by Dunn test. Statistically significant differences at the level of $\alpha = 0.05$ or improvement in performance was observed in tasks 4 and 5. The topics of these tasks are easier to learn and practice for the students then the other topics of the exam.

Our next aim was to find the relation between grade and number of terms necessary to get the grade. Testing the dependence between these two variables by χ^2 -test of independence gave a statistically significant dependence at the level of significance 0.05. The result is displayed by mosaic plot in Figure 3. We can observe that in first term grades A-D occur more often than in the second and third terms. We can also see that there is a significant number of students who get FX in the first term. These are the students who gave up after one term or attended only the last possible term. In second term there was no grades A and B get. On the other hand at third term there were students who finally got even A, B and C. Still significant rate of the students got FX in the third term.

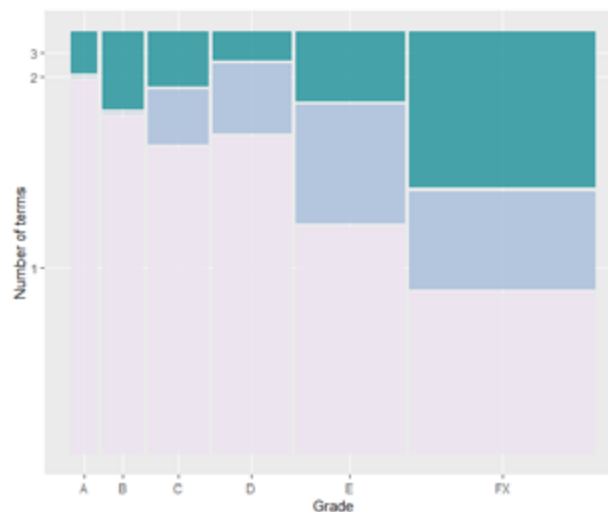


Figure 3: Dependence between number of terms and grades

4. Conclusion

Mathematics is one of the core subjects in civil engineering. In this paper we evaluated the results of the examination of Mathematics 2 of students of civil engineering. We focused on the overall results of the examination as well as on the performance within each tasks from term to term. We observed that the hardest topic for the students are differential equations. We also observed statistically significant improvement on in tasks associated with plane contact problem and searching for extremes of functions of several variables. We also described strong dependence between students grade and number of terms the student attended to get the grade. The obtained results can be used in the future direction of the practices in Mathematics 2.

Bibliography

- [1] KRUSKAL, W.H., WALLIS, W.A.: Use of ranks in one-criterion variance analysis. *J. Am. Stat. Assoc.* 47, 907–911 (1952)
- [2] DUNN, O. J. (1961) Multiple comparisons among means. *Journal of the American Statistical Association.* 56, 52–64
- [3] R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- [4] H. Wickham (2016) *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.
- [5] Alexis Dinno (2017). *dunn.test: Dunn's Test of Multiple Comparisons Using Rank Sums*. R package version 1.3.5. <https://CRAN.R-project.org/package=dunn.test>

Pavol Jánoš¹

Študijný program: Aplikovaná matematika, ročník: 3.

A NOTE ON THE MCKAY-MILLER-ŠIRÁŇ GRAPHS AS ABELIAN LIFTS OF MULTIGRAPHS OF DIAMETER TWO

Abstract

In 1998 McKay, Miller and Širáň introduced a construction of graphs of diameter 2, degree d and order $\frac{8}{9}\left(d + \frac{1}{2}\right)^2$ for an infinite set of degrees by means of Abelian lifts of complete bipartite graphs with loops at vertices. In this paper we study Abelian lifts of complete bipartite multigraphs in general and show that, in some sense the construction by McKay, Miller and Širáň is best possible.

Key words

Moore bound, voltage assignments, graph lifting, multigraph

1. Introduction

Motivated by numerous applications in modeling and computer science, the degree-diameter problem in graph theory asks for determining the largest number of vertices $n_{d,k}$ (called the order) of a graph of given maximum degree d and diameter k . This problem was introduced in 1960 by A. J. Hoffman and R. R. Singleton [2], in their paper entitled *On Moore graphs with diameter 2 and 3*, published in the IBM Journal of Research and Development. Since 1960's a number of variations of this problem have emerged and subsequently they have been surveyed by M. Miller and J. Širáň [5], in their paper *Moore graph and beyond*, the second edition dated 2013.

There is a straightforward upper bound on the largest possible order of graphs of maximum degree d and given diameter k , i.e. (d, k) -graphs, called the *Moore bound* after E. R. Moore, where $n_{d,k} \leq 1 + d + d(d - 1) + \dots + d(d - 1)^{k-1}$. In the special case of diameter $k = 2$ the order of such $(d, 2)$ -graphs is bounded above by $d^2 + 1$. This value is attained only for $d = 2, 3, 7$, and possibly 57, as it was shown by Hoffman and Singleton in [2]. The same authors also pointed that for remaining $d \geq 2$ one has $n_{d,2} \leq d^2 - 1$. The two natural directions of research arising from these results are investigation of large graphs of given degree and diameter on the one hand and proving non-existence of graph of order close to the Moore bound on the other hand.

2. Graph lifting

To obtain lower bounds on $n_{d,k}$ we use an important way to construct large graphs called *voltage assignments*. This approach, developed by Gross and Tucker [1], is focused on 'reversing' process of covering construction, that is, covering $f : H \rightarrow G$ of a graph G by a graph H , which is a continuous function with the property that the star neighborhood of every vertex v in H is mapped bijectively onto the star neighborhood of $f(v)$ in G . Then, the voltage assignments technique,

¹ Mgr., Radlinského 11, Bratislava, 810 05

starting with a graph G , tries to describe some of its covers H with interesting degree-diameter properties using a special type of assignments on edges of graph G as an elements of a finite group.

We recall here just a few basic facts and simple definition of voltage assignments and we also refer to [3], where we have described this technique in more detail as well as its direct use in graph lifting. The objects we are going to lift will be multigraphs for larger generality. In order to describe let G by a multigraph, then in order to describe the graph lifting construction we will think of every edge h of G as consisting of two oppositely directed darts x, x^{-1} , and write $h = \{x, x^{-1}\}$, and let $V(G)$ and $D(G)$ be the vertex set and the dart set of G . Given a finite group Γ , a voltage assignment on G in Γ is a mapping $\alpha: D(G) \rightarrow \Gamma$ such that $\alpha(x^{-1}) = (\alpha(x))^{-1}$ for every $x \in D(G)$. Then the lift G^α of G by α has vertex set $V(G^\alpha) = V(G) \times \Gamma$ and $D(G^\alpha) = D(G) \times \Gamma$. For any dart x of $D(G)$ from a vertex u to a vertex v and for any $g \in \Gamma$ there is a dart (x, g) in G^α from the vertex (u, g) to the vertex $(v, g\alpha(x))$. The darts (x, g) and $(x^{-1}, g\alpha(x))$ form an undirected edge of G^α , this the lift is an undirected graph. The original graph G is called the *base graph* of the lift, and for each vertex u of G the set $\{(u, g), g \in \Gamma\}$ of vertices of the lift is called the *fibre* above u .

This technique became popular mainly in connection with the paper of McKay, Miller and Širáň [4] in the late 1990's, where the authors also proved that there is an easy way to control the diameter of a lift in terms of the base graph and the voltage assignment; for usage of this finding in a graph lifting see [3].

Using of this technique in a graph constructions and determining an upper bound on the order of (d, k) -graphs formed the stream of research initiated by the discovery of the so-called McKay-Miller-Širáň graphs [4], i.e. graphs of diameter $k = 2$ and maximum degree d , whose order is $\frac{8}{9}(d + \frac{1}{2})^2$ for every d of the form $(3q - 1)/2$, where q is a prime power congruent to 1 (mod 4). Authors in [4] constructed these graphs as a lifts of graphs obtained from a complete bipartite graph $K_{q,q}$ by attaching $(q - 1)/4$ loops at each vertex of such a graph and the voltage assignments on its edges in the additive group. It is interesting to note that the smallest McKay-Miller-Širáň graph for $q = 5$ is isomorphic to the Hoffman-Singleton graph and also that for $q = 9$ the corresponding $(13, 2)$ -graph has order 162, that is, only 8 less than the given Moore bound $d^2 + 1 = 170$; and so the order these graphs still stand as the currently best lower bound on $n_{d,k}$.

Šiagiová later discovered in [6] a simplified version of the construction of McKay-Miller-Širáň graphs, i.e. that these graphs are actually lifts of dipoles with $(q - 1)/4$ loops at each vertex and q parallel edges between vertices of such dipole. The voltage assignments on these parallel edges are labeled by $(i, p(i))$, where p is an arbitrary but fixed quadratic polynomial. It is also interesting to mention another result of Šiagiová in connection with lifting dipoles, who showed in [7] that, an upper bound on the order of lifts of dipoles using voltage assignments in an Abelian group is bounded above by

$$\frac{4(10 + \sqrt{2})}{49}(d + 0,34)^2 \approx 0,932(d + 0,34)^2.$$

This result compares well with the Moore bound $d^2 + 1$, and showed that there might be a possibility to beat the already mentioned currently best lower bound on $n_{d,k}$, which asymptotically goes to $\approx 0,889d^2$.

Our motivation based on the results of McKay, Miller and Širáň, as well as the study of dipoles by Šiagiová, was to find out how lifts of regular bipartite graphs in general (with the same number of loops and semi-edges at each vertex), as a natural generalization of dipoles retaining bipartiteness, would complete against the already known results. In [3] we provided calculation of an upper bound of the order of graphs of diameter 2 constructed by lifting complete bipartite multigraphs with voltage assignments in an Abelian group. Here we just mention our Proposition pointing to this upper bound as a result of computing walk possibilities in a base graph, which is a multigraph with l loops and s semi-edges.

Proposition 2.1 Let $G = K_{n,n}(m, l, s)$, $n \geq 2$ be a complete bipartite multigraph and let α be a voltage assignment on G in an Abelian group A such that the lift G^α has diameter two. Then, the order of G^α is bounded above by

$$\omega(m, l, s) = 2n \cdot \min \left\{ nm(m-1) + 2l(l+1) + 2ls + \frac{s(s+1)}{2} + 1, m(4l+2s+1), nm^2 \right\}.$$

3. The main result

Building on our results from [3], already mentioned in the previous chapter, where we showed that we are able to obtain the upper bound on the order of an Abelian lifts of complete bipartite multigraphs just by doing computations on the voltage assignments on the edges of a base graph, we now prove an estimate of fundamental importance for our purposes.

Theorem 3.1 Let α be a voltage assignment in an Abelian group on an complete bipartite multigraph G of degree d such that the lift G^α has diameter 2. Then, for any fixed $d \geq 10$ and $n \geq 2$, the order of G^α is bounded above by

$$\frac{8}{9} \left(d + \frac{1}{2} \right)^2.$$

Proof. Let G be a complete bipartite multigraph $K_{n,n}(m, l, s)$ of degree d , with the same number n of vertices in both partitions, where $n \geq 2$, $m \geq 1$ and $l, s \geq 0$ such that $d = nm + 2l + s$. Let α be a voltage assignment on G in an Abelian group A of order at most $\omega(m, l, s)$, cf. Proposition 2.1. We use a term $s = d - nm - 2l$ as a substitution in $\omega(m, l, s)$ to derive a bound on the order of the lift in terms of d . As a result of this substitution we have a modified form of the polynomials p_1 , p_2 and p_3 of $\omega(m, l, s)$ in variable in m as an argument

$$p_1(m) = \left(\frac{n^2}{2} + n \right) m^2 + \left(-\frac{3n}{2} - dn \right) m + \frac{d(d+1)}{2} + l + 1$$

$$p_2(m) = (-2n)m^2 + (2d+1)m$$

$$p_3(m) = nm^2$$

where $1 \leq m \leq \frac{d}{n}$ and $0 \leq l \leq \left\lfloor \frac{d-n}{2} \right\rfloor$.

To derive an upper bound on $|G^\alpha|$ we determine

$$M = \max_m \min \{p_1(m), p_2(m), p_3(m)\}.$$

For an upper bound on M it is sufficient to replace m by a continuous real argument x and determine the quantity

$$M^* = \max_x \min \{p_1(x), p_2(x), p_3(x)\}$$

and since the x ranges over all real numbers, we have $M \leq M^*$. To determine the value of M^* it is necessary to examine the position of parabolas corresponding to $p_1(x)$, $p_2(x)$ and $p_3(x)$, and the points of their intersection, since the value of M^* will be attained at one of these points.

Observe that the parabolas $p_1(x)$ and $p_3(x)$ are concave up while the parabola $p_2(x)$ is concave down and the x -coordinates of their vertices are $V_1 = \frac{2d+3}{2n+4}$, $V_2 = \frac{2d+1}{4n}$ and $V_3 = 0$. An inspection, with respect to the case when $d \rightarrow \infty$ and $n \geq 2$, shows that $V_3 < V_2 \leq V_1$. The roots x_{12} and y_{12} of the equation $p_1(x) = p_2(x)$, respectively, are given by

$$\frac{2dn + 4d + 3n + 2 \pm \sqrt{(16 - 8n)d^2 + (8n^2 + 8n + 16)d + (1 - 8l)n^2 - (48l + 36)n + 4}}{2n^2 + 12n}$$

the roots of the equation $p_1(x) = p_3(x)$ are

$$x_{13}, y_{13} = \frac{2d + 3 \pm \sqrt{8d - 8l + 1}}{2n}.$$

Taking into the account that the root x_{23} of the equation $p_2(x) = p_3(x)$ is equal to 0 and the root y_{23} is equal to $\frac{2d+1}{3n}$, then for the case when

$$x_{13} \geq y_{23},$$

the $M^* = \max_x \min \{p_1(x), p_2(x), p_3(x)\} = p_3(y_{23})$ and the resulting upper bound on the number of vertices of the lift will be determined as $2n \cdot M^* = 2n \cdot p_3(y_{23})$. In the opposite case will be M^* determined in the root x_{13} or in the root y_{12} , depending on which of their y -coordinates is higher.

Therefore, we only need to determine when the case $x_{13} \geq y_{23}$ holds, that is, when

$$2n \cdot p_3(y_{23}) = \frac{8}{9} \left(d + \frac{1}{2} \right)^2$$

for any fixed $n \geq 2$, regardless of the number of loops and semi-edges at each vertex, as in the statement of the Theorem 3.1.

Reflecting on this proof, for $d \leq 9$ the maximum is achieved at $n = 2$ and $l = \left\lfloor \frac{d-2}{2} \right\rfloor$, and the corresponding values rounded down to the nearest even number for individual degrees (along with the points of intersection where the maximum was determined), are shown in the following table:

| d | M^* determined in | Order of lift |
|-----|---------------------|---------------|
| 5 | root y_{12} | 26 |
| 6 | root y_{23} | 36 |
| 7 | root y_{23} | 50 |
| 8 | root y_{23} | 64 |
| 9 | root y_{23} | 80 |

Entries in the right-hand side column of our table are all smaller than or equal to $\frac{8}{9} \left(d + \frac{1}{2} \right)^2$ for the corresponding values of $d \in \{5, \dots, 9\}$, and we pointed them out because extrema of the functions appearing in the proof are attained at different points. We do not include the remaining values for

$d \leq 5$ since the $(d, 2)$ -graphs for these degrees are already known and are significantly bigger than our results for these values.

These results shows that there is no better bound on the order of Abelian lifts of complete bipartite multigraphs based on $K_{n,n}$ for $n \geq 2$ of given degree d and diameter 2 than $\frac{8}{9}\left(d + \frac{1}{2}\right)^2$, which is also the order of graphs known as the McKay-Miller-Širáň graphs [5, 6], where for any $d \geq 10$ there are no restrictions on the number of loops and semi-edges at each vertex in the base graph G . In addition, the consequence of this result, in the light of the previous results of McKay, Miller, Širáň [5] and Šiagiová [6], is surprising because it shows that Abelian lifts of dipoles and complete bipartite multigraphs for $n \geq 2$ lead to different upper bounds.

Finally, we note that it would be tempting to try to look at lifts of regular complete graphs with uneven parts, already indicated in [3]. However, our initial calculations confirmed the intuition that outweighing the imbalance of parts by changing the number of loops or semi-edges to maintain regularity, results in imbalance of the number of walks and hence in a smaller number $n_{d,k}$.

Acknowledgements

This work was partially supported by the APVV Research Grants 15-0220 and 17-0428, and the VEGA Research Grants 1/0142/17 and 1/0238/19.

References

- [1] GROSS, J. L. and TUCKER, T. W.: *Topological Graph Theory*. New York: Wiley (1987).
- [2] HOFFMAN, A. J. and SINGLETON, R. R.: On Moore graphs with diameter 2 and 3. *IBM J. Res. Develop.* **4**. (1960), 497-504.
- [3] JÁNOŠ, P.: Lifting complete bipartite multigraphs to graphs of diameter two. Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering: 28 th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering, (2018). ISBN: 978-80-227-4864-3.
- [4] MCKAY B. D., MILLER M. and ŠIRÁŇ J.: A note on large graphs of diameter two and given maximum degree. *J. Combinat. Theory Ser. B*, **74** (1998) No. 1, 110-118.
- [5] MILLER, M. and ŠIRÁŇ, J.: Moore graphs and beyond: A survey of the degree/diameter problem. *Electronic Journal of Combinatorics*. (2005), Dynamic Survey DS14.
- [6] ŠIAGIOVÁ, J.: A note on the McKay-Miller-Širáň graphs. *J. of Combinat. Theory Ser. B*, **81** (2001) 205-208.
- [7] ŠIAGIOVÁ, J.: A Moore-like bound for graphs of diameter 2 and given degree obtained as Abelian lifts of dipoles. *Acta Math. Univ. Comen.*, **71** (2002) No. 2, 157-161.

Adam Šeliga¹

Študijný program: aplikovaná matematika, 3. ročník

ASYMETRICKÝ INTEGRÁL VZHLADOM KU KOLEKCIÁM

ASYMMETRIC COLLECTION INTEGRAL

Abstract

In this paper we modify the definition of a collection integral introduced in [3] only for non-negative functions to the linear space of all bounded functions defined on a finite set. Some properties such as the positive homogeneity of the extended integral, called asymmetric collection integral, is proved. Unfortunately, the asymmetric collection integral is not monotone nor super-additive, in general.

Kľúčové slová

collection integral, non-linear integral, asymmetric extension

1. Introduction

The theory of non-linear integrals is a still-growing area of mathematics and a lot of papers and new ideas are published in the field. A very natural development of non-linear integrals is to introduce integral for non-negative functions and then to find some extension of the integral for all bounded functions which preserves some of the properties of the original integral.

In this paper we provide a modification of the collection integral introduced in [4] based on the property of shift-invariance of an extension of Choquet integral, called asymmetric Choquet integral, given in [1]. Moreover, the asymmetric collection integral is not an extension of the collection integral, because its restriction to \mathcal{F}_+ (see preliminaries) is not the same as the collection integral, in general. Nevertheless, asymmetric collection integral restricted to the class \mathcal{F}_0 is the same as the collection integral restricted to \mathcal{F}_0 .

The rest of the paper is organized as follows. In Section 2 we give some preliminary definitions that are going to be useful later. In Section 3 we introduce the asymmetric collection integral and we prove some of its properties and give some examples. In the last section, some concluding remarks are added.

2. Preliminaries

In this paper, let X be any non-empty finite set. The class of all functions with domain X and codomain \mathbb{R} will be denoted by \mathcal{F} . Two sub-classes of \mathcal{F} will be considered, the first one consisting only of non-negative functions

$$\mathcal{F}_+ = \{f \in \mathcal{F} : f \geq 0\}$$

and the second one consisting of non-negative functions with minimum equal to zero, i.e.,

¹ Ing. Adam Šeliga, Department of Mathematics and Descriptive Geometry, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovakia

$$\mathcal{F}_0 = \{f \in \mathcal{F}_+ : \min f(X) = 0\},$$

where $\min f(A) = \min\{f(x) : x \in A\}$. Note that $\mathcal{F}_0 \subsetneq \mathcal{F}_+ \subsetneq \mathcal{F}$ and also that \mathcal{F} is a linear space over the field of real numbers.

A capacity is any set function $\mu : 2^X \rightarrow [0, \infty[$ such that μ is grounded, i.e., $\mu(\emptyset) = 0$, and increasing with respect to set inclusion, i.e., $A \subseteq B \subseteq X$ implies $\mu(A) \leq \mu(B)$.

A collection integral was introduced in [4] as a special class of decomposition integrals [2, 3]. A collection, mostly denoted by \mathcal{D} , is a non-empty subset of $2^X \setminus \emptyset$. A collection integral with respect to a collection \mathcal{D} and a capacity μ is an operator

$$I_{\mathcal{D}}^{\mu} : \mathcal{F}_+ \rightarrow [0, \infty[\text{ such that } f \mapsto \bigvee \left\{ \sum_{A \in \mathcal{D}} \alpha_A \mu(A) : \sum_{A \in \mathcal{D}} \alpha_A 1_A \leq f, \alpha_A \geq 0 \right\}.$$

3. Asymmetric collection integral

One of the properties of asymmetric collection integral proved later will be shift-invariance. The proof of super-additivity of collection integral is now presented.

Proposition 1. $I_{\mathcal{D}}^{\mu}$ is a super-additive operator, i.e., $I_{\mathcal{D}}^{\mu}(f + g) \geq I_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) + I_{\mathcal{D}}^{\mu}(g)$ for all $f, g \in \mathcal{F}_+$.

Proof. Let us start with any decompositions of f , respectively g , more precisely by non-negative real numbers $\alpha_A, \beta_A \geq 0$, for $A \in \mathcal{D}$, such that

$$\sum_{A \in \mathcal{D}} \alpha_A 1_A \leq f \quad \text{and} \quad \sum_{A \in \mathcal{D}} \beta_A 1_A \leq g.$$

Note that then

$$\sum_{A \in \mathcal{D}} (\alpha_A + \beta_A) 1_A \leq f + g,$$

i.e., by summing up the previous two decompositions we obtain a decomposition of $f + g$. This implies the super-additivity of $I_{\mathcal{D}}^{\mu}$

$$I_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) + I_{\mathcal{D}}^{\mu}(g) \leq I_{\mathcal{D}}^{\mu}(f + g)$$

as claimed. ■

Note that the collection integral is defined only on non-negative functions and the goal of this section is to modify this definition to a linear space \mathcal{F} while preserving shift-invariance. In this manner we propose the following definition of *asymmetric collection integral*.

Definition 1. Let \mathcal{D} be a collection and μ be a capacity. An operator

$$\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu} : \mathcal{F} \rightarrow \mathbb{R} \text{ such that } f \mapsto I_{\mathcal{D}}^{\mu}(f - (\inf f)1_X) + (\inf f)I_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X)$$

is called an asymmetric collection integral with respect to a collection \mathcal{D} and a capacity μ .

Remark 1. Note that both functions entering $I_{\mathcal{D}}^{\mu}$ in the previous definition, i.e., functions $f - (\inf f)1_{\Omega}$ and 1_{Ω} , are non-negative and thus $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}$ is well-defined.

Let us give one example of asymmetric collection integral.

Example 1. Let us consider a space X and a chain $X \supseteq A_1 \supseteq A_2 \supseteq \dots \supseteq A_k \neq \emptyset$ on it. Let μ be any capacity and $\mathcal{D} = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$ be a collection. Then, in [3], it was proved that

$$I_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) = \sum_{i=2}^k (\min f(A_i) - \min f(A_{i-1}))\mu(A_i) + \mu(A_1) \min f(A_1),$$

or

$$I_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) = \sum_{i=1}^k (\min f(A_i) - \min f(A_{i-1}))\mu(A_i)$$

with a convention that $\min f(A_0) = 0$. Observe that the above formula for $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}$ can be rewritten into

$$\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) = \sum_{i=2}^k (\min f(A_i) - \min f(A_{i-1}))\mu(A_i) + \mu(A_1) \min f(A_1).$$

Observe that the above formula for $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}$ can be rewritten into

$$\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) = \sum_{i=1}^k (\min f(A_i) - \min f(A_{i-1}))\mu(A_i)$$

with a convention $A_{k+1} = \emptyset$, what proves the coincidence of $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}$ and $I_{\mathcal{D}}^{\mu}$ on \mathcal{F}_+ , as well as the monotone non-decreasingness of this integral for such \mathcal{D} . More, it is obvious that for any $f \in \mathcal{F}_+$, $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}$ is non-negative, what, indeed, ensures the super-additivity of $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}$.

Now we prove some basic properties of the asymmetric collection integral.

Lemma 1. $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X) = I_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X)$.

Proof. The proof follows directly from the definition of $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}$, i.e.,

$$\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X) = I_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X - (\inf 1_X)1_X) + (\inf 1_X)I_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X) = I_{\mathcal{D}}^{\mu}(0 \cdot 1_X) + I_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X) = I_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X)$$

as claimed. ■

Proposition 2. $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}$ is positively homogeneous, i.e., for all $f \in \mathcal{F}$ and all $\alpha \geq 0$ we have

$$\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(\alpha f) = \alpha \bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f).$$

Proof. Let $f \in \mathcal{F}$ and let $\alpha \geq 0$. Then

$$\begin{aligned} \bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(\alpha f) &= I_{\mathcal{D}}^{\mu}(\alpha f - (\inf \alpha f)1_X) + (\inf \alpha f)I_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X) \\ &= \alpha \left(I_{\mathcal{D}}^{\mu}(f - (\inf f)1_X) + (\inf f)I_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X) \right) = \alpha \bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) \end{aligned}$$

and thus, the proposition follows. ■

Proposition 3. $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) \geq (\inf f)\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X)$ for all $f \in \mathcal{F}$.

Proof. It easily follows

$$\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) = I_{\mathcal{D}}^{\mu}(f - (\inf f)1_X) + (\inf f)I_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X) \geq (\inf f)I_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X) = (\inf f)\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X)$$

using Lemma 1 for any $f \in \mathcal{F}$. ■

Proposition 4. $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}$ is shift-invariant, i.e., for all $f \in \mathcal{F}$ and all $\beta \in \mathbb{R}$ we have

$$\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f + \beta 1_X) = \bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) + \beta \bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X).$$

Proof. From the definition of $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}$ and its positive homogeneity, we easily obtain that

$$\begin{aligned}\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f + \beta 1_X) &= I_{\mathcal{D}}^{\mu}(f + \beta 1_X - (\inf(f + \beta 1_X))1_X) + (\inf(f + \beta 1_X))I_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X) \\ &= I_{\mathcal{D}}^{\mu}(f - (\inf f)1_X) + (\inf f)I_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X) + \beta I_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X) \\ &= \bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) + \beta \bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X)\end{aligned}$$

as claimed. ■

The results of propositions 2, 3, and 4 are recapitulated in the following theorem.

Theorem 1. *Let $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}$ be an asymmetric collection integral. Then*

1. $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) \geq (\inf f)\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X)$;
 2. $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(\alpha f) = \alpha \bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f)$; and
 3. $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f + \beta 1_X) = \bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) + \beta \bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(1_X)$
- for all $f, g \in \mathcal{F}$ and $\alpha \geq 0, \beta \in \mathbb{R}$.

Some of the properties of the collection integral are preserved also by the asymmetric collection integral.

Example 2. Let us consider a function $f \in \mathcal{F}_0$. Then one trivially obtains that $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) = I_{\mathcal{D}}^{\mu}(f)$, i.e., $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f)$ is an extension of the collection integral restricted to the space \mathcal{F}_0 . Now, let us consider a function $f \in \mathcal{F}_+$ on the space $X = \{1,2,3\}$ given by $f(1) = 1, f(2) = 2$, and $f(3) = 1$ and a collection $\mathcal{D} = \{\{1,2\}, \{2,3\}\}$. Trivially one obtains that

$$\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) = \max\{\mu(\{1,2\}), \mu(\{2,3\})\}$$

but

$$I_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) = \mu(\{1,2\}) + \mu(\{2,3\}).$$

This illustrates the fact that $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}$ is not an extension of $I_{\mathcal{D}}^{\mu}$ defined on \mathcal{F}_+ .

Now we give an example illustrating the fact that the asymmetric collection integral is not monotone, in general.

Example 3. One of the main properties of the super-collection integral is the monotonicity. To see that $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}$ is not monotone let us consider a space $X = \{1,2,3,4\}$, a collection $\mathcal{D} = \{\{2,3\}, \{2,4\}, \{3,4\}\}$, and two functions f, g given by $f(1) = 1, f(2) = f(3) = 2, f(4) = 3$ and $g(1) = g(2) = g(3) = 2, g(4) = 3$. Let μ be a capacity such that for any $A \in \mathcal{D}$ we have $\mu(A) = 1$. Then one can trivially compute that

$$\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) = 3.5 \quad \text{and} \quad \bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(g) = 3.$$

This illustrates the fact that $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}$ is not monotone on \mathcal{F}_+ , in general, and thus neither on \mathcal{F} . On the other hand, it easily follows that it is indeed monotone on the space \mathcal{F}_0 . Note that if $h = g - f$, it holds $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(h) = 0$ and thus $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f + h) = 3 < 3.5 = \bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(f) + \bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}(h)$, violating the super-additivity of $\bar{I}_{\mathcal{D}}^{\mu}$.

4. Concluding remarks

In this paper we have introduced a modification of the collection integral called an asymmetric collection integral. We proved some properties inherited from the properties of the collection integral and showed some properties that are not preserved. Some examples were added.

For future research we are interested in finding some new applications for this type of asymmetric integral. Also, we will be interested in the study of similar modification of the super-collection integral.

Acknowledgement

The research of the author was supported by the Slovak Research and Development Agency under the contract no. APVV-17-0066.

Bibliography

- [1] DENNEBERG, D.: Non-additive measure and integral. Kluwer Academic, Dordrecht. 1994.
- [2] EVEN, Y., LEHRER, E.: Decomposition-integral: unifying Choquet and the concave integrals. *Economic Theory*. 2014, roč. 56, s. 33-58.
- [3] MESIAR, R., STUPŇANOVÁ, A.: Decomposition integrals. *International Journal of Approximate Reasoning*. 2013, roč. 54, s. 1252-1259.
- [4] ŠELIGA, A.: Decomposition integral without alternatives, its equivalence to Lebesgue integral, and computational algorithms. *Submitted to Journal of Automation*.

APPLIED MECHANICS

*Lýdia Moroczová*¹

Študijný program: Aplikovaná mechanika, 3. ročník

VZPERNÁ ODOLNOSŤ TLAČENÉHO CFS-PRÚTA POMOCOU DSM.

BUCKLING RESISTANCE OF CFS-COLUMN USING DSM.

Abstract

The paper contains a solution of CFS-Column under compression using DSM (Direct Strength Method). The boundary conditions are hinge-hinge. It investigates individual buckling modes, local, distortional and global buckling using GBTUL, CUFSM and ANSYS.

Kľúčové slová

CFS-prút, DSM, GBTUL, CUFSM, vzperná odolnosť

1. Úvod

Metóda priamej pevnosti (DSM - *Direct Strength Method*) bola vyvinutá Schaferem a Peközem [1]. Je užitočným nástrojom na navrhovanie CFS-prvkov (tenkostenných za studena tvarovaných prvkov, anglicky *Cold-formed Steel – CFS*) s mnohými výhodami oproti metóde efektívnej šírky, ktorá je v súčasnosti hlavnou metódou navrhovania v mnohých normách na celom svete. Jeho prístup je realistickejší a výpočty sú jednoduchšie a rýchlejšie. Táto metóda bola overená rozsiahlym výskumom. Zatiaľ čo metóda efektívnej šírky je založená na určení efektívneho prierezu, DSM počíta pružnú nestabilitu celej časti, pracuje s efektívnymi napätiami odvodenými z kritickkej sily/momentu a medze klzu. V 2004 sa táto metóda dostala aj do americkej normy.

V príspevku je riešený konkrétny CFS-C-prierez: výška prierezu $h=170\text{mm}$, šírka prierezu $b=138\text{mm}$, dĺžka pozdĺžnych výstuh $c=42\text{mm}$ a hrúbka stien prierezu $t=6\text{mm}$. Vo výpočte sa neuvažuje so zaoblením v rohoch prierezu. Prút je uvažovaný ako obojstranne kĺbovo podopretý, s centrickým pôsobením koncového osového zaťaženia.

2. Identifikácia režimov pri strate stability

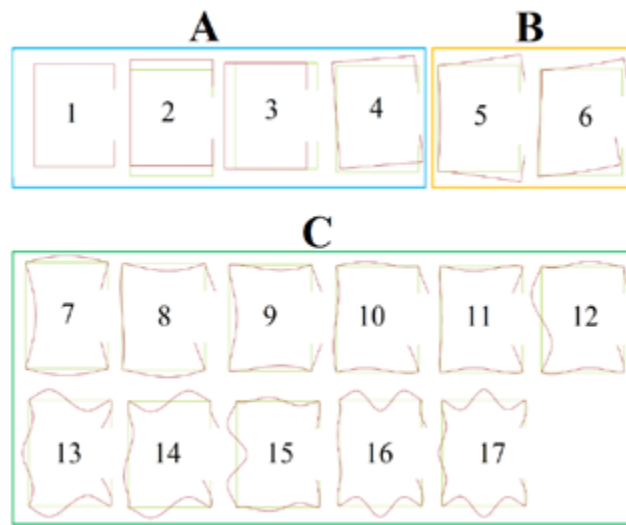
Overeniu odolnosti, podľa DSM, predchádza stanovenie kritických síl pre jednotlivé vzperné režimy, lokálnu stratu stability, distorzny vzper a globálnu stratu stability. Ich identifikovanie je vykonané troma vzájomne nezávislými programami GBTUL, CUFSM a ANSYS, kde každý využíva iné výpočtové postupy.

2.1 Kritické zaťaženie podľa GBT s použitím programu GBTUL

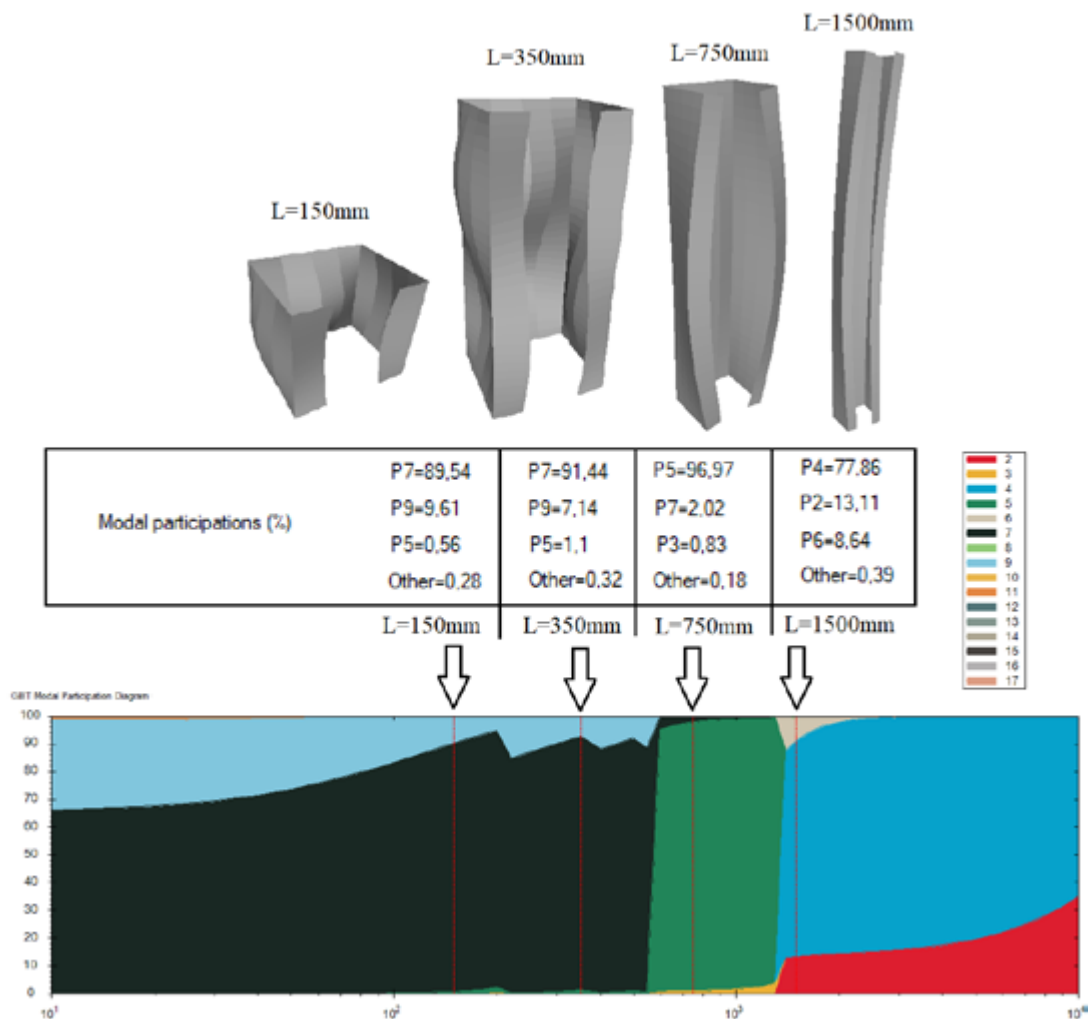
GBTUL je program vyvinutý na technickej univerzite v Lisabone, katedre stavebného inžinierstva (DECivil) <http://www.civil.ist.utl.pt/gbt> a pracuje na základe metódy GBT – zovšeobecnená ohybovo-krúťová teória (GBT – *Generalized Beam Theory*). Výpočet je uskutočnený v dvoch krokoch: (i) analýza prierezu, kde sa určia deformačné režimy prierezu (obr.1)

¹ Lýdia Moroczová, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra stavebnej mechaniky

a (ii) analýza prúta, kde sa určí koeficient kritického zaťaženia. Program nám dáva možnosť určiť percentuálny podiel (*Modal Participation*) jednotlivých deformačných režimov prierezu (obr.2).



Obrázok 1: Deformačné režimy prúta A) základné podľa Vlasova B) distorzné C) lokálne (GBTUL).

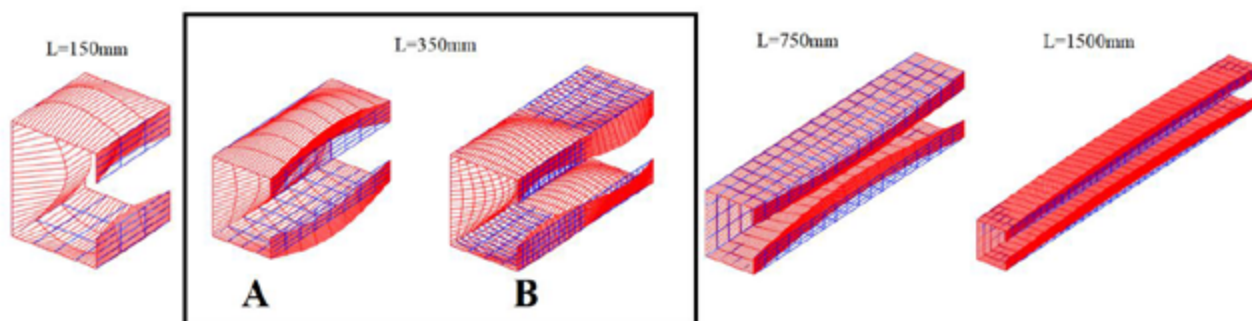


Obrázok 2: Podiel jednotlivých deformačných tvarov prierezu na vzpernom režime (GBTUL).

Napríklad pre prút dĺžky 150mm sa daný tvar pri strate stability skladá z 89,54% a 9,61% z lokálneho vydúvania stien (obr. 1 – deformačný režim prierezu číslo 7 = P7; a číslo 9 = P9), 0,56% z distorznej deformácie prierezu (obr. 1– deformačný režim prierezu číslo 5 = P5) a z 0,28% iných deformačných režimov prierezu, ktoré sú v konečnom dôsledku zanedbateľné.

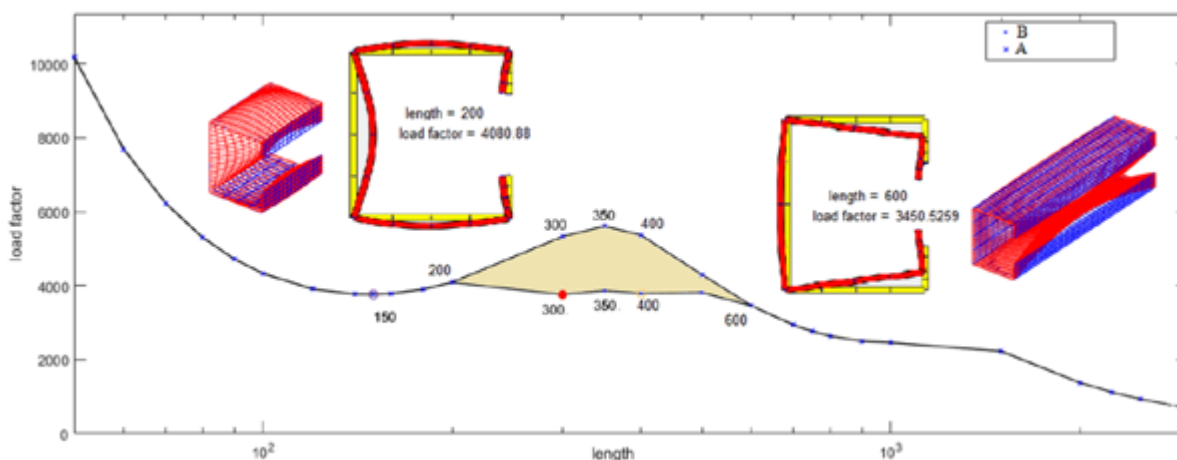
2.2 Kritické zaťaženie podľa FSM s použitím programu CUFSM

CUFSM je program vyvinutý výskumníkmi na Cornell University, ktorý využíva FSM- metódu konečných pásov: <https://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm/>. Výpočet koeficienta kritického zaťaženia prebehol dvoma spôsobmi: A) „tradičným“ spôsobom, určeným len pre klbové okrajové podmienky, pri ktorom sú hodnoty v maticiach elastickej a geometrickej tuhosti len na diagonálach, čo umožňuje rýchle a efektívne riešenie. B) riešenie „všeobecných“ okrajových podmienok s vlastnou možnosťou určenia počtu pozdĺžnych tvarových funkcií (pri (A) je použitá len jedna pozdĺžna funkcia-polvlna sínusu).



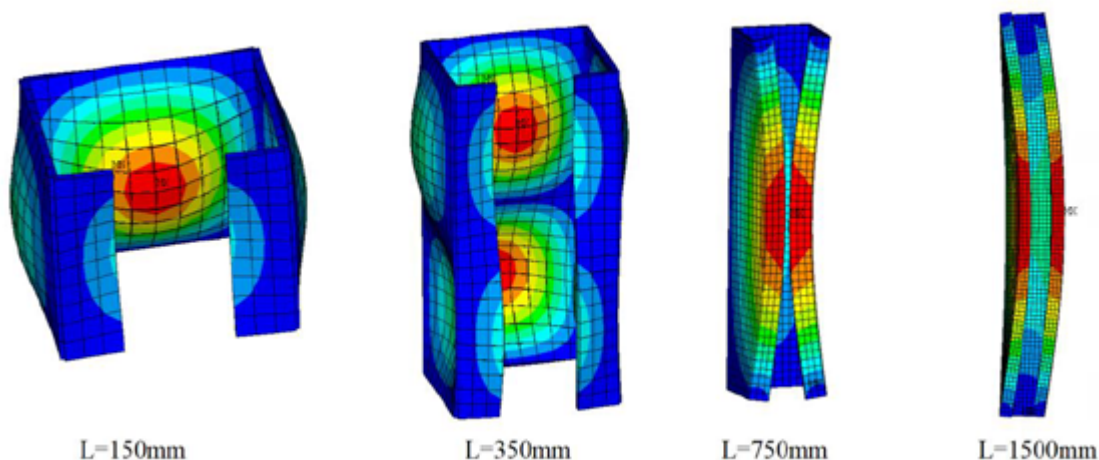
Obrázok 3: Tvary prúta pri strate stability ($L=150\text{mm}$ – lokálna strata stability; $L(A)=350\text{mm}$ a 750mm - distorzna strata stability; $L(B)=150\text{mm}$ – lokálna strata stability; $L=1500\text{mm}$ - globálna strata stability) (CUFSM)

Na obrázku 4 je porovnanie riešenia (A) a (B), možno si všimnúť, že medzi vyšetrovanými hodnotami dĺžky prúta 200 a 600 mm dochádza k nárastu koeficienta kritického zaťaženia pri riešení (A) oproti riešeniu (B). Program CUFSM pri (A) nesprávne vyhodnotil vzperné režimy prvku ako distorzne vzpery, ako je jasne ukázané aj na obrázku 3.



Obrázok 4: Porovnanie riešenia (A) a (B) (CUFSM)

2.3 Kritické zaťaženie podľa FEM s použitím programu ANSYS



Obrázok 4: Tvary CFS-C-prierezu pri strate stability (ANSYS)

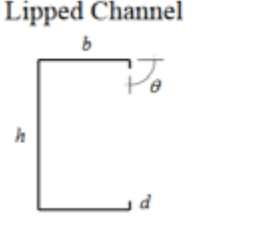
Výsledky kritického zaťaženia, pre všetky tri spôsoby riešenia sú spracované v nasledovných tabuľkách:

Tabuľka 1: Porovnanie kritického zaťaženia - GBTUL CUFSM ANSYS

| | GBTUL | CUFSM (A) | CUFSM (B) | ANSYS |
|------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|
| L | F _{cr} | F _{cr} | F _{cr} | F _{cr} |
| [mm] | [kN] | [kN] | [kN] | [kN] |
| 100 | 4381,262 | 4326,8578 | 4320,498 | 3850,8 |
| 120 | 3964,902 | 3908,2024 | 3902,458 | 3520,6 |
| 140 | 3829,038 | 3768,2099 | 3762,671 | 3428,8 |
| 150 | 3825,629 | 3762,0488 | 3756,519 | 3443,1 |
| 160 | 3853,125 | 3786,305 | 3780,74 | 3485,4 |
| 180 | 3978,451 | 3903,533 | 3897,796 | 3635,7 |
| 200 | 4172,474 | 4086,8853 | 4080,878 | 3847,7 |
| 350 | 3939,824 | 5604,7031 | 3861,322 | 3691,5 |
| 750 | 2835,745 | 2763,0389 | 2758,978 | 2759 |
| 1500 | 2283,236 | 2225,1759 | 2221,905 | 2224,4 |
| 2250 | 1132,508 | 1118,3409 | 1116,697 | 1115,5 |
| 3000 | 681,168 | 675,6981 | 674,705 | 673,4848 |
| 3750 | 467,454 | 464,2866 | 463,604 | 462,6125 |
| 4500 | 349,973 | 347,5932 | 347,082 | 346,2912 |
| 5250 | 278,223 | 276,1826 | 275,777 | 275,1078 |
| 6000 | 230,849 | 228,9933 | 228,657 | 228,4237 |
| 6750 | 197,607 | 195,8806 | 195,593 | 195,6352 |
| 7500 | 173,105 | 171,4856 | 171,2334 | 171,4534 |
| 8250 | 154,289 | 152,7697 | 152,545 | 152,8781 |
| 9000 | 138,333 | 137,9109 | 137,708 | 138,1069 |

3. Vzperná odolnosť tlačeneho CFS-prúta podľa DSM

DSM má geometrické a materiálové obmedzenie pre použiteľnosť výpočtu (obr.5) bledo-šedé hodnoty nie sú rozhodujúce a tým pádom povinné [2]. Vyšetrovaný C-prierez spĺňa tieto podmienky.

| | |
|---|--|
|  | $34 < h/t < 472$ $18 < b/t < 159$ $4 < d/t < 33$ $0.7 < h/b < 5.0$ $0.05 < d/b < 0.41$ $\theta \sim 90 \text{ deg.}$ $340 < E/F_y < 1020$ $(29 \text{ ksi} < F_y < 86 \text{ ksi}) \text{ or } (200 \text{ MPa} < F_y < 593 \text{ MPa})$ |
|---|--|

Obrázok 5: Obmedzenie DSM (obr. prevzatý z [2])

Výpočtu predchádza určenie kritických síl pre jednotlivé vzperné režimy (lokálna, distorzná a globálna strata stability) hodnoty sú prebraté z tabuľky 1.

Vstupné hodnoty:

$A_{ch} = 2988 \text{ mm}^2$ - plocha neoslabeného prierezu

$f_y = 500 \text{ MPa}$

$P_{cre} = 2178,048 \text{ kN}$ – kritická sila pri globálnej strate stability (tab.3.1) pre $L = 1500 \text{ mm}$

$P_{crd} = 2445,173 \text{ kN}$ – kritická sila pri distorznej strate stability (tab.3.1) pre $L = 1000 \text{ mm}$

$P_{crl} = 3707,045 \text{ kN}$ – kritická sila pri lokálnej strate stability (tab.3.1) pre $L = 150 \text{ mm}$

$$P_y = A_g f_y \quad (1)$$

Pomerné štíhlosti:

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{P_y}{P_{cre}}} = 0.828; \quad \lambda_l = \sqrt{\frac{P_{ne}}{P_{crl}}} = 0.55; \quad \lambda_{dc} = \sqrt{\frac{P_y}{P_{crl}}} = 0.782 \quad (2)$$

Odolnosť tlačeneho prúta pri globálnej strate stability:

$$P_{ne} := \begin{cases} \left[\left(0.658 \lambda_c^2 \right) \cdot P_y \right] & \text{if } \lambda_c \leq 1.5 \\ \left[\left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) \cdot P_y \right] & \text{if } \lambda_c > 1.5 \end{cases}$$

$$P_{ne} = 1121 \text{ kN} \quad (3)$$

Odolnosť tlačeneho prúta pri lokálnej strate stability:

$$P_{nl} := \begin{cases} P_y & \text{if } \lambda_l \leq 0.776 \\ \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \right] \cdot \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \cdot P_{ne} & \text{if } \lambda_l > 0.776 \end{cases} \quad (4)$$

$$P_{nl} = 1494 \text{ kN}$$

Odolnosť tlačeneho prúta pri distorznej strate stability:

$$P_{nd} := \begin{cases} P_y & \text{if } \lambda_d \leq 0.561 \\ \left[1 - 0.25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right] \cdot \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} P_y & \text{if } \lambda_d > 0.561 \end{cases} \quad (5)$$

$$P_{ne} = 1333 \text{ kN}$$

Výsledná odolnosť v tlaku:

$$P_n := \min(P_{nl}, P_{nd}, P_{ne}) = 1.121 \times 10^3 \text{ kN} \quad (6)$$

4. Záver

Práca je venovaná identifikácii vzperných režimov pomocou výpočtových programov, v ktorých sú implementované súčasné znalosti chápania CFS-prvkov. Programy ako GBTUL a CUFSM nám dávajú pohodlný a jednoduchý spôsob riešenia hodnôt pre určenie kritického zaťaženia pri pružnej strate stability. Výsledky boli porovnané programom ANSYS. Najvyššie hodnoty kritického zaťaženia sa získali riešením pomocou GBTUL, najmenšie pomocou programu ANSYS. Veľmi dobrá zhoda všetkých troch programov je pri režimoch globálnej strate stability, naopak najväčšie odchýlky pri lokálnej strate stability. Pri riešení vzperných režimov pomocou programu CUFSM, pre prúty s obojstranne kĺbovým podopretím, je nutné pre správnu identifikáciu lokálnych vzperných režimov zvoliť viac pozdĺžnych funkcií pre analýzu prúta po dĺžke.

Určenie lokálnej, distorznej a globálnej straty stability, ako aj ich vzájomná interakcia, je však len úvodom do zložitého správania CFS-prvkov. Umožňuje nám overenie odolnosti CFS-prúta podľa najnovších poznatkov. Diskutovaná téma DSM, má veľký potenciál pri návrhu a overení CFS-prvkov. V súčasnosti však stále chýba jednotná metóda návrhu CFS-prvok, ktorá by zhŕňala súčasné znalosti.

Literatúra

- [1] Schafer, B. W. - Peköz, T.: "Direct Strength Prediction of Cold-Formed Steel Members using Numerical Elastic Buckling Solutions", Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis, Missouri, 1998
- [2] Schafer B.W.: „Direct strength Method of Cold-formed Steel Design“, Design Manual for: American Iron and Steel Institute - Committee on Specifications, 2002
- [3] Schardt R., „Verallgemeinerte Technische Biegetheorie“, Springer-Verlag, Berlin. (in German), 1989.
- [4] Camotim D, Basaglia C, Bebiano R, Gonçalves R, Silvestre N. "Latest developments in the GBT analysis of thin-walled steel structures, Proceedings of International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures Stability", E. Batista, P. Vellasco, L. Lima (eds.), COPPE/Federal University of Rio de Janeiro, 33-58., 2010
- [5] Camotim D, Basaglia C, Silvestre N (2010). „GBT buckling analysis of thin-walled steel frames: a state-of-the-art report“, Thin-Walled Structures, 48(10-11),726-743.
- [6] Schafer, B.W. and Ádány, S., Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: Conventional and constrained finite strip methods., in 18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures: Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction. p. 39-54.,2006.

Jakub Rubint¹

Študijný program: Aplikovaná mechanika, 2. ročník

VYUŽITIE OPTICKÝCH ZARIADENÍ PRI MERANÍ ŠÍRKY TRHLÍN V KONŠTRUKCIÁCH ZAŤEŽENÝCH DYNAMICKÝM ZAŤAŽENÍM.

POSSIBILITIES OF USING OPTICAL INSTRUMENTS FOR MEASURING CRACK WIDTH IN DYNAMICALLY LOADED STRUCTURES

Abstract

Under dynamic load of structure, the crack width changes during measurement, making it impossible to use conventional direct measurement methods, which require crack to be steady at least for the time required to perform the measurement. In this case, indirect measurement methods may be used to determine the crack width based on analytical calculations from structural deformations. The accuracy of indirect methods therefore depends on the quality and quantity of the input data required for the calculation. However, in practice, we encounter cases where the boundary conditions as well as the physical properties of the materials used in the structures are not unambiguous and therefore such measurements are burdened with errors. The paper describes the possibility of using the camera as a tool for direct determination of crack width on structures subjected by dynamic loads.

Kľúčové slová

dynamika, optika, prahovanie, meranie šírky trhliny v čase

1. Úvod

Vznik a rozvoj trhlín sú chyby, ktoré vzhľadom na svoj charakter a šírenie reflektujú stav konštrukcie zohľadňujúc pritom jednak vlastnosti použitých materiálov a ich interakciu ako aj vonkajšie vplyvy. Podľa charakteru ich pôvodu rozdeľujeme v betónových konštrukciách trhliny na technologické a statické. Príčinou statických trhlín sú silové účinky zaťaženia konštrukcie, zatiaľ čo príčinou technologických trhlín sú účinky objemových zmien, zamŕzanie preniknutej vody, korózia nedostatočne chránenej výstuže a pod.

Najbežnejším spôsobom merania šírky trhlín je použitie tzv. trhlinomeru, ktorý môže byť opatrený zväčšovacím sklom alebo použitý súčasne s mikroskopom. Presnosť merania sa pohybuje v rozmedzí 0,05mm až 0,1mm. S väčšou presnosťou je možné pohyb trhliny sledovať inštaláciou snímačov merajúcich pretvorenie. Snímače pozostávajú z dvoch častí, umiestnených po oboch stranách trhliny kolmo na jej trajektóriu. Prepočtom je možné určiť roztvorenie trhliny s presnosťou cca 0,1mm [1]. Sofistikovanejšou metódou merania šírky trhlín je použitie optických prístrojov. Tieto zariadenia sú zobrazujú zväčšený obraz záujmovej oblasti spolu s pravítkom, vďaka ktorému je možné odčítať šírku trhliny. Použitie týchto zariadení ako aj použitie jednoduchého trhlinomeru je ovplyvnené pozorovacou chybou jednotlivca. Tento článok opisuje vylepšenie skúmania trhlín pomocou optických zariadení, rozšírením o automatickú determináciu jej šírky.

¹ Jakub, Rubint, Ing. Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského11, 810 05 Bratislava



Obrázok 1: Jednoduchý trhlinomer (vľavo), optické zariadenie (vpravo)

2. Dôvody automatizácie merania

2.1 Redukcia chýb merania

Determinácia šírky trhlín konvenčnými metódami je subjektívnym názorom jednotlivca vykonávajúceho meranie. Tieto merania sú ovplyvnené množstvom faktorov ako napríklad svetelné podmienky, povrch skúmanej oblasti konštrukcie alebo samotná rozlišovacia schopnosť oka. Tieto merania sú teda zaťažené chybami. Opakované merania trhliny na tom istom mieste rôznymi jednotlivcami vedie k normálnej distribúcií nameraných hodnôt. Opatrenia použité na elimináciu týchto chýb sú opísané v nasledujúcich odstavcoch.

2.2 Meranie v čase

Navrhnuté zariadenie môže sledovať záujmovú oblasť a jej správanie sa v reálnom čase. Táto oblasť môže byť nasnímaná a analyzovaná aj viac ako 30 krát za sekundu, čo je nemožné pre priame meranie konvenčnými metódami. Zariadenie opatrené kamerou s vysokou vzorkovacou frekvenciou spolu s hardwarom s vysokým výpočtovým výkonom eventuálne môže nájsť uplatnenie v skúmaní správania sa trhlín na konštrukciách zaťažených dynamickými účinkami.

2.3 Dlhodobý monitoring konštrukcie

Pri tejto metóde merania je možné nastaviť časový interval, v ktorom sa monitorovacie zariadenie spustí, analyzuje záujmovú oblasť a vyhodnotené snímky následne uloží. V prípade možnosti pripojenia na internet, automaticky odošle dáta na server. Takisto je možné vo vyhodnocovacom programe nastaviť limitnú šírku trhliny pri ktorej systém automaticky odošle varovnú správu príslušným orgánom.

3. Meracie zariadenie



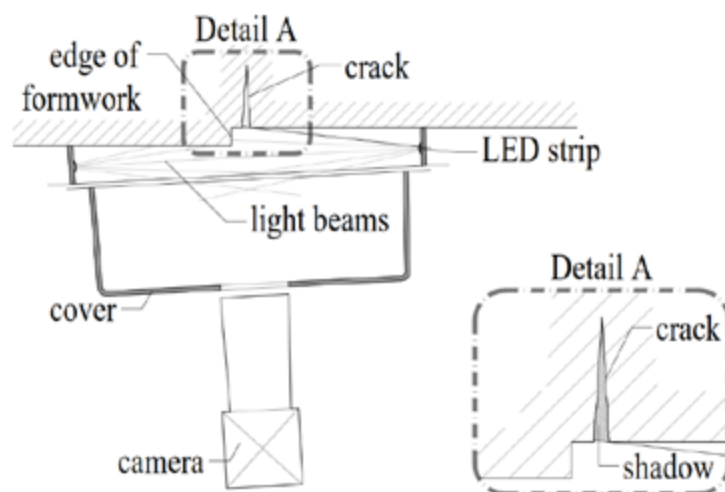
Obrázok 2: Render konceptu meracieho zariadenia

3.1 Kamera

Použitá kamera na účel vývoja zariadenia je 8-bitová, Flir Flea FL-GE-20S4M-C [2] s rozlíšením 1624x1224 pixelov, so vzorkovacou frekvenciou, s ohniskovou vzdialenosťou 25mm. 8-bitový variant bol zvolený pre zrýchlenie celého procesu vyhodnocovania. Použitím kamery sú eliminované chyby spôsobené rolišovacou schopnosťou ľudského oka.

3.2 Clona

Svetelné podmienky zohrávajú dôležitú úlohu pri akomkoľvek optickom meraní. V zlých svetelných podmienkach, môže byť problémom identifikovať trhlinu a následne určiť jej šírku. Takisto rovnaký problém nastáva pri tmavých alebo nerovných povrchoch (napríklad. hrany od debnenia), ktoré vrhajú tieň. V prípade výskytu trhliny pozdĺž takejto hrany, je determinácia jej šírky použitím konvenčných metód nemožná. Pre kameru bola navrhnutá clona s LED podsvietením. Clona samotná bráni osvetleniu záujmovej oblasti prirodzeným resp. okolitým svetlom, zatiaľ čo LED pásy vo vnútri clony osvetľujú trhliny pod malým uhlom, čím vytvárajú v trhline tieň zatiaľ a osvetľujú okolitý povrch trhliny. Tým sú zaistené vždy rovnaké svetelné podmienky pre každé meranie.



Obrázok 3: Schéma meracej zostavy

3.3 Vyhodnocovacie zariadenie

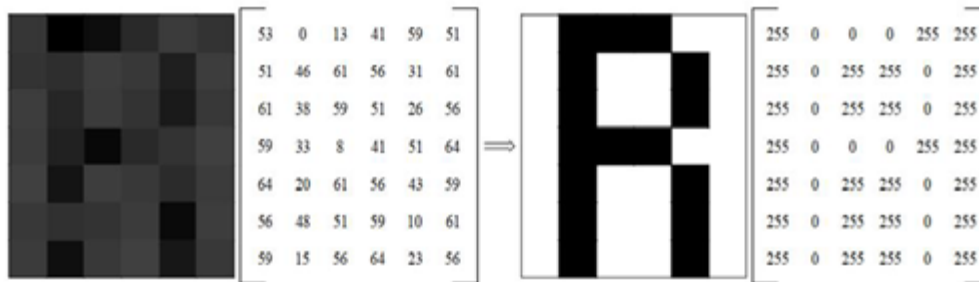
Software pre vyhodnocovanie výsledkov bol vytvorený pod operačným systémom Linux použitím GPL- licencovaných knižníc ako Qt a OpenCV. Program je schopný prijímať z kamery snímky a v reálnom čase prepočítavať všetky operácie. Na procesore i7-7700 vyžadoval 1/8 dostupného výpočtového výkonu pri vzorkovacej frekvencii 15Hz (limit použitej kamery). Je teda možné očakávať plnú funkčnosť pri použití slabšieho hardwaru resp. Pri použití kamery s vyššou vzorkovacou frekvenciou.

4. Software

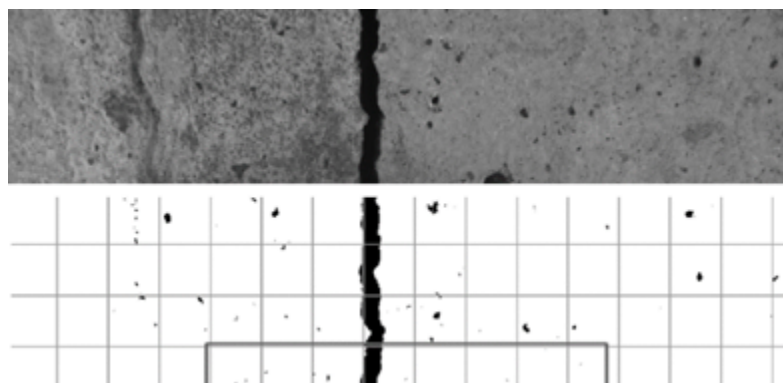
Cieľom návrhu bolo vytvoreniu programu, ktorý dokáže analyzovať prichádzajúce snímky z kamery, detekovať trhlinu a determinovať jej šírku v reálnom čase. Preto musia byť snímky prichádzajúce z kamery upravené.

4.1 Prahovanie obrazu [3]

Snímok 8-bitovej kamery môže byť reprezentovaný maticou s rotermi jej rozlíšenia v pixeloch. Jednotlivé členy matice sú čísla s hodnotami od 0-255 reprezentujúcimi odtiene šedej každého pixelu. Člen matice s hodnotou 0 reprezentuje totálnu tmú, čiže čiernu. Naopak člen matice s hodnotou 255 reprezentuje maximálnu hodnotu svetla dopadajúceho na čip kamery, čiže ide o farbu bielu. Pri prahovaní obrazu je zavedené jednoduché pravidlo, kde keď má akýkoľvek člen matice hodnotu menšiu ako nastavený parameter, je jeho hodnota zmenená na nulu. Naopak ak má ktorýkoľvek člen matice hodnotu väčšiu ako zvolený parameter, jeho hodnota sa mení na 255. Tým dostávame čierno-biely obrázok, ktorý zvýrazní tmavé miesta na obrázku. V tomto prípade tieň v trhline.



Obrázok 4: Ilustrácia prahovania snímku (parameter 50)



Obrázok 5: Prahovanie snímku s trhlinou

4.2 Adaptívne prahovanie obrazu

V prípade výskytu veľkého množstva tmavých miest na obrázku môže nastať situácia keď prahovanie obrazu zvýrazní tmavé oblasti ktoré nie sú zaujímavé z hľadiska merania. Kvôli zabezpečeniu správneho zobrazovania trhliny aj pri takýchto podmienkach, je pridaná možnosť skúmanú oblasť analyzovať po úprave obrazu takzvaným adaptívnym prahovaním. Takéto prahovanie neporovnáva členy matice so zvoleným parametrom globálne. Namiesto toho porovnáva členy matice s ich bezprostredným okolím.



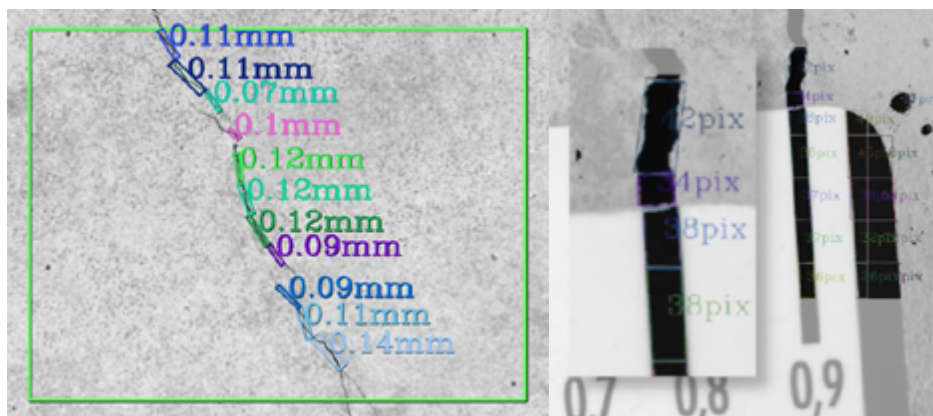
Obrázok 6: Pôvodný snímok (vľavo), globálne prahovanie (stred), adapt. prahovanie (vpravo)

4.3 Hraničné oblasti

Na editovanom snímku program vytvorí raster bielych čiar, ktorý trhlinu rozdelí na určitý počet prvkov. Program rozpoznáva kde sa na snímku mení čierna farba na bielu. Následne tieto hranice opíše najmenšími možnými obdĺžnikmi a vytvorí tým hraničné oblasti [4]. V ideálnom prípade by menšia z hrán hraničných oblastí určovala práve šírku trhliny v pixeloch. Trhlinka samotná je však len vo výnimočných prípadoch rovná. Pri trhlinách tvaru krivky je hodnota šírky trliny prepočítaná redukciou dĺžky menšej z hrán hraničných oblastí. Redukčný koeficient je vypočítaný na základe pomeru bielej a čiernej farby nachádzajúcej sa v hraničnej oblasti prvku.

4.4 Kalibrácia a determinácia šírky trhlín

Z analýzy snímokov získavame výsledky v relatívnych jednotkách (v pixeloch). Je preto nevyhnutné tieto hodnoty konvertovať do absolútnych jednotiek dĺžky [5]. Akákoľvek oblasť je skenovaná vždy z rovnakej dĺžky. Tým pádom je zabezpečené, že akákoľvek jednotka dĺžky má na snímku rovnaký priemer. Pre účel kalibrácie bol nasnímaný jednoduchý trhlínomer.



Obrázok 7: Výstup programu

5. Záver

Podarilo sa nám úspešne navrhnuť a vyrobiť zariadenie, ktoré dokáže samostatne automaticky detekovať trhlinu na povrchu konštrukcie. Program následne detekovanú trhlinu analyzuje a stanoví jej šírku. Toto zariadenie dokáže pracovať za akýchkoľvek svetelných podmienok a eliminuje chyby merania, vyskytujúce sa pri použití konvenčných spôsobov merania. Trhlina je na testovacom zariadení analyzovaná 15krát za sekundu. Použitie takéhoto zariadenia na skúmanie správania sa trhliny na konštrukcii počas dynamického zaťaženia je teda obmedzené vzorkovacou frekvenciou kamery a výpočtovým výkonom vyhodnocovacieho zariadenia. Pri použití kamery s nižšou vzorkovacou frekvenciou pri použití nižšieho výpočtového výkonu je možné zariadenie použiť na dlhodobý monitoring konštrukcie. S prídavnými modulmi je možné zariadenie rozšíriť o automatické odosielanie údajov na server/cloud alebo zariadenie použiť na varovanie pri zmenách šírky trhlín a tým predísť potenciálnym nebezpečenstvám.

Použitá literatúra

- [1] *DIAGNOSTIC METHODS FOR DETECTING BRIDGE FAULTS*, Technical regulation, Slovakia, 2012, pp 3-4;
- [2] Flea3 GigE, *Technical Reference*, Canada, 2013, pp 11-12.
- [3] A. JAIN, *Fundamentals of Digital Image Processing*, Prentice-Hall, USA, 1986, pp 408.
- [4] C.K. CHOW, T. KANEKO, *Automatic Boundary Detection of the Left Ventricle from Cineangiograms*, *Comp. Biomed. Res.*, USA, 1972, pp. 388-410.
- [5] E. DAVIES, *Machine Vision: Theory, Algorithms and Practicalities*, Academic Press, USA, 1990, pp 91 - 96.

Matúš Turis¹

Študijný program: Aplikovaná mechanika, 3.ročník

PLASTICKÁ ZÓNA MALÉHO ROZSAHU V OKOLÍ TRHLINY

SMALL SCALE YIELDING IN THE VICINITY OF THE CRACK TIP

Abstract

The contribution deals with the determination of small scale yielding in the vicinity of the crack tip. The geometry considered is a *single edge notch bending specimen* subjected to pure mode *I* loading. First step of solution is determination of the *stress intensity factor* and assumption of plastic zone using linear elastic fracture mechanics principles. Subsequently, the elasto-plastic material is to be considered and results of these two approaches are compared. The problem is evaluated for both plane stress and plane strain condition.

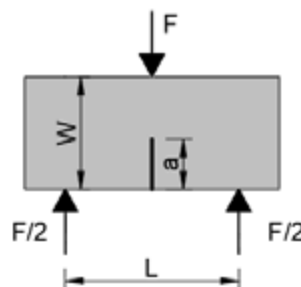
1. Úvod

Napät'ová analýza v blízkom okolí koreňa trhliny s uvážením lineárne elastickeho materiálu vedie pri $r \rightarrow 0$ k tzv. napät'ovej singularite, kedy zložky tenzora napätí $\sigma_{ij} \rightarrow \infty$. Takýto stav však z fyzikálneho hľadiska nie je prijateľný a v reálnom materiáli ani nemôže nastať. Pri uvážení materiálov schopných plastických deformácií, je v mieste koncentrácie napätí prekročená medza klzu, následkom čoho vznikne lokálna plastická deformácia.

Pre prípad, že plastická zóna má malý rozsah, je možné pre popísanie správania sa telesa s trhlinou použiť aj princípy *lineárne elastickej lomovej mechaniky* (ďalej *LEFM*, z angl. linear elastic fracture mechanics) s niektorými úpravami, ktoré budú uvedené ďalej. Aplikovateľnosť tohto postupu na určenie skutočného rozsahu plastickej zóny je zhodnotená ďalej.

2. Predpoklady riešeného problému

Nami zvolená geometria je nosník obsahujúci okrajovú trhlinu zaťaženú trojbodovým ohybom (ďalej *SENB*, z angl. single edge notch bending specimen), obr. 1.



Obr.1: Geometria *SENB*

Jednotlivé rozmery a zaťaženie uvedené na obr. 1 sú dĺžka nosníka $L=130$ mm, šírka nosníka $W=25$ mm; dĺžka trhliny $a=12,5$ mm; hrúbka nosníka $B=10$ mm a aplikované zaťaženie $F=450$ N.

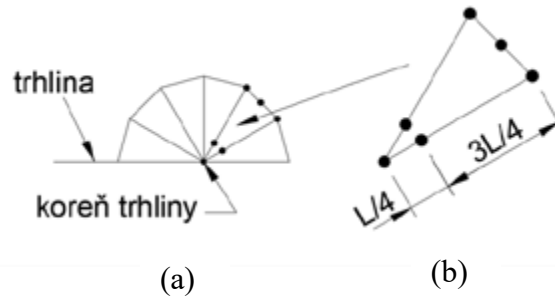
¹ Matúš, Turis, Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, +421 904 277 587, matus.turis@stuba.sk

2.1 Konečno-prvkový model

Keďže v koreni trhliny dochádza v lineárne elastickom materiáli k singularite napätia, reprezentovanej zložkou $1/\sqrt{r}$ musí byť zvolená hustá sieť v jeho blízkom okolí [1].

V našom prípade boli použité kvadratické konečno-prvkové elementy, ktorých každý uzol má dva stupne voľnosti, posuny v smere x a y .

V literatúre sa často vyskytuje rotačné usporiadanie elementov v okolí trhliny, ktoré sa javí ako najvhodnejšie z dôvodu, že v prvom rade takýchto elementov sa v koreni trhliny ich jednotlivé uzly stretajú. Toto usporiadanie je zobrazené na obr.2 (a).



Obr.2: (a) degenerácia prvkov v blízkom okolí koreňa trhliny (b) modifikované singulárne prvky

Na obr.2 (b) sú zobrazené tzv. singulárne elementy v prvom rade rotačne usporiadaných elementov. Dosiachnutie singulárnych elementov je možné posunutím stredových uzlov elementu do jednej štvrtiny vzhľadom ku koreňu trhliny. Použitím týchto elementov možno vystihnúť singularitu v koreni trhliny, ktorá sa pozitívne prejaví aj na výsledkoch *SIF*.

2.2 Stanovenie tvaru plastických zón princípmi LEFM

Nato, aby bolo možné určiť hranice plastických zón pre jednotlivé módy zaťaženia, možno využiť von Mises-ovo kritérium plasticity na základe ekvivalentných napätí. Podľa tohto kritéria oblasť plasticity nastáva tam, kde ekvivalentné napätia dosiahnu resp. prekročia medzu klzu. Vyjadrenie ekvivalentných napätí podľa von Misesa možno zapísať nasledovne

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (1)$$

kde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ sú hlavné napätia, ktorých výpočet je známy z teórie pružnosti. Polárnu súradnicu hranice plastickej zóny $r_y(\theta)$ možno stanoviť tak, že ekvivalentné napätie σ_e postavíme rovné napätiu na medzi klzu σ_{ys} . Výsledné riešenie pre mód *I* je uvedené v tabuľke 1.

Tabuľka 1: Polomery ohraničenia plastických zón r_y ako funkcia uhla θ pre mód zaťaženia *I*.

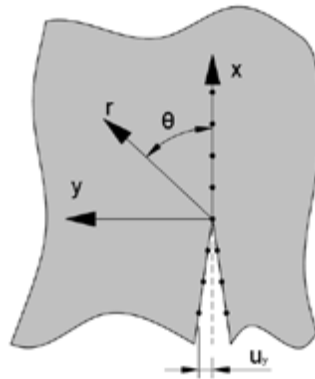
| Ozn. | $r_y(\theta)$ | Stav |
|-------|---|------|
| Mód I | $\frac{1}{4\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \left[1 + \cos\theta + \frac{3}{2} \sin^2\theta \right]$ | RN |
| | $\frac{1}{4\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \left[(1 - 2\nu)^2 (1 + \cos(\theta)) + \frac{3}{2} \sin^2(\theta) \right]$ | RD |

kde RN charakterizuje stav rovinnej napätosti a RD stav rovinnej deformácie, K_I je koeficient intenzity napätia a polárne súradnice sú zobrazené na obr. 3.

2.3 Stanovenie SIF pomocou extrapoláčnej metódy

Hodnotu SIF možno vyjadriť priamo z definície pomocou extrapolácie pre $r = 0$. Ďalej budú uvedené tri metódy pre určenie SIF: napät'ová extrapoláčná metóda, extrapoláčná metóda premiestnení a metóda posunutých uzlov. Takéto riešenie je uvedené vo veľkom množstve dostupnej literatúry, napríklad [2-6].

Na obr. 3 je zobrazená geometria trhliny a začiatok súradného systému potrebný pre extrapoláčnú metódu.



Obr. 3: Súradnicový systém trhliny, čiernymi bodkami sú vyznačené jednotlivé uzly, pred a za koreňom trhliny

Pri napät'ovej extrapoláčnej metóde SEM (z angl. stress extrapolation method) pre mód I sa vychádza zo vzťahov pre rozloženie napätí v okolí koreňa trhliny. Ak uvážime extrapoláciu SIF za koreňom trhliny v rovine, ktorá ňou prechádza, teda pre $\theta = 0$, dostaneme vzťah (2).

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_y \sqrt{2\pi r}) \quad \text{pre } \theta = 0 \quad (2)$$

Konštantný člen funkcie trendovej spojnice pre SEM je zároveň SIF , ktorý vyšiel s hodnotu $K_I = 125,19 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$.

V prípade extrapoláčnej metódy premiestnení DEM (z angl. displacement extrapolation method) možno vychádzať zo vzťahov pre posunutia uzlov v smere y , pre orientovaný uhol $\theta = \pi$ teda pred koreňom trhliny. Modul pružnosti bol vo výpočtoch uvážený hodnotou $E = 200 \text{ GPa}$ a Poissonovo číslo $\nu = 0,3$.

Pre stav rovinnej napätosti vyplýva

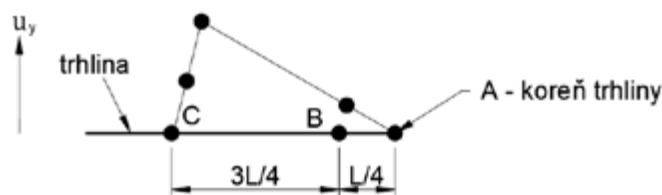
$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left[\frac{Eu_y}{4} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \right] \quad \text{pre } \theta = \pi \quad (3)$$

resp. pre stav rovinnej deformácie

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left[\frac{Eu_y}{4(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \right] \quad \text{pre } \theta = \pi \quad (4)$$

Získané výsledky z DEM pre stav rovinnej napätosti sú $K_I = 125,53 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ a pre stav rovinnej deformácie $K_I = 125,46 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$.

Pomocou metódy posunutých uzlov *NDM* (z angl. node displacement method) možno stanoviť *SIF* pomocou prvého radu rotačne usporiadaných singulárnych elementov. Geometria takto riešeného prípadu je na obr. 4, kde je kvôli prehľadnosti vyobrazený len jeden element.



Obr.4: Označenie pre metódu posunutých uzlov

SIF možno z takto zvoleného elementu určiť nasledovne

$$K_I = \frac{E'}{12} \sqrt{\frac{2\pi}{l}} (8u_y^B - u_y^C), \quad (5)$$

kde $E' = E$ pre stav *RN* a $E' = E/(1-\nu^2)$ pre stav *RD*. Dosadením posunov jednotlivých uzlov *B* a *C* v smere *y* možno z numerickej analýzy získať hodnotu *SIF* pre stav *RN* $K_I = 125,77 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ a pre stav *RD* $K_I = 125,57 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$.

2.4 Materiálový model

Na popísanie pracovného diagramu bol použitý tzv. Ramberg-Osgoodov model z literatúry [7]. Pomocou tohto modelu možno vystihnúť správanie sa materiálu určené pomocou troch konštánt a to napätia na medzi klzu σ_{ys} k nemu prislúchajúcemu pretvoreniu ε_{ys} a koeficientu spevnenia materiálu n . V našom prípade boli zvolené tri koeficienty spevnenia $n = 5$ - vysoké spevnenie, $n = 10$ - stredné spevnenie a $n = 50$ - nízke spevnenie. Vzťah, ktorým možno určiť pracovné diagramy podľa Ramberg-Osgooda, je daný závislosťou

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ys}} = \frac{\sigma}{\sigma_{ys}} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_{ys}} \right)^n. \quad (6)$$

Zvolené parametre použitého materiálu sú: $E = 200 \text{ GPa}$, $\sigma_{ys} = 320 \text{ MPa}$ a n ktorých hodnoty boli uvedené vyššie.

3. Výsledky a diskusia

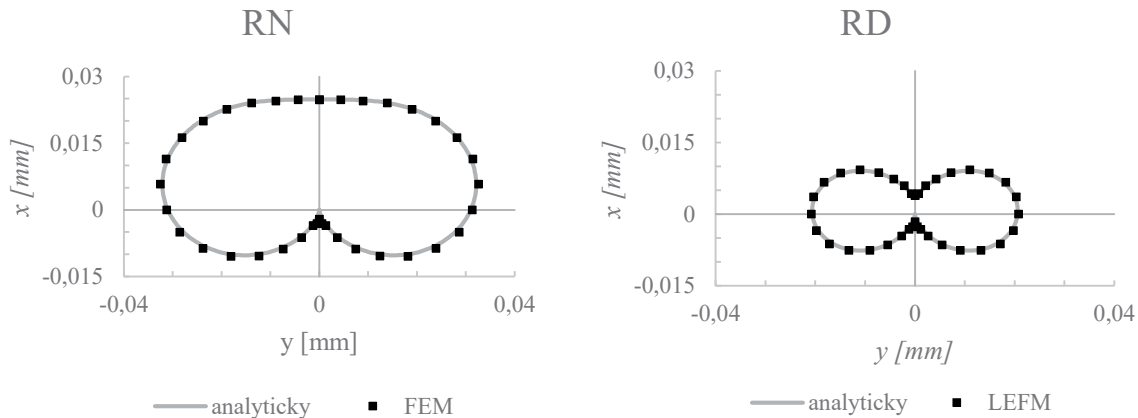
V kapitole 2.2 boli popísané niektoré základné princípy určenia tvaru plastickej zóny v blízkom okolí koreňa trhliny vychádzajúc z princípu *LEFM*. V tejto kapitole poukazujeme na aplikovateľnosť týchto princíпов. Výsledky analýzy sú porovnané s literatúrou pre skutočné sa správanie materiálov, ktoré v pracovnom diagrame vykazujú plastickej deformáciu.

3.1 Tvar plastickej zóny vychádzajúc z princíпов *LEFM*

Prvým priblížením tvaru plastickej zóny môže byť vyhodnotenie izočiary v okolí trhliny, kde je dosiahnutá medza klzu materiálu podľa von Mises-ovho kritéria.

Na vyhodnotenie analytického riešenia podľa tabuľky 1 je potrebné poznať hodnotu *SIF*, ktorého hodnota bola určená viacerými metódami a zhodnotená je v kapitole 2.3. Dosadením do vzťahov

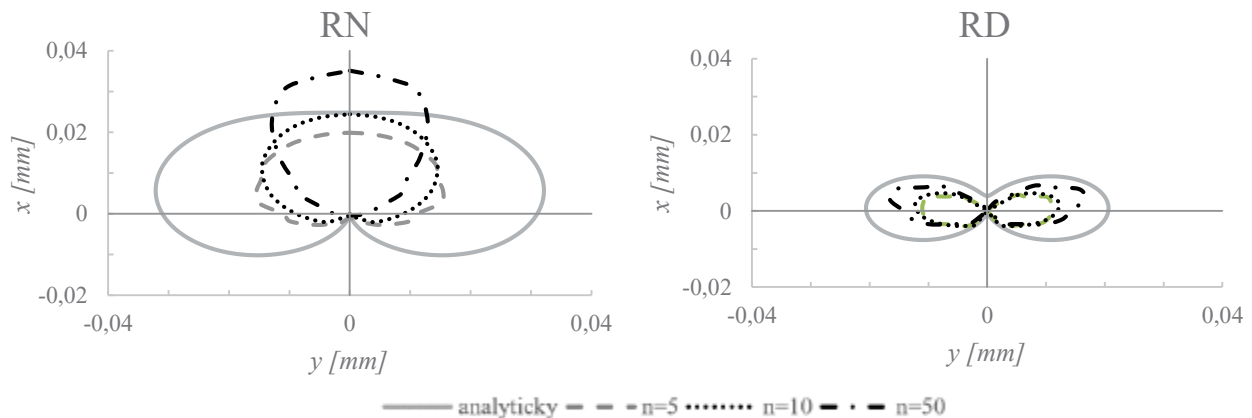
v tab. 1 pre stav *RN* a *RD* možno porovnať analytické riešenie prvej aproximácie plastickej zóny s výsledkami získanými numerickou analýzou, ktoré sú zobrazené na obr. 5.



Obr.5: Porovnanie výsledkov ekvivalentných napätí na medzi klzu medzi analytickým a numerickým riešením pre *RN* a *RD*

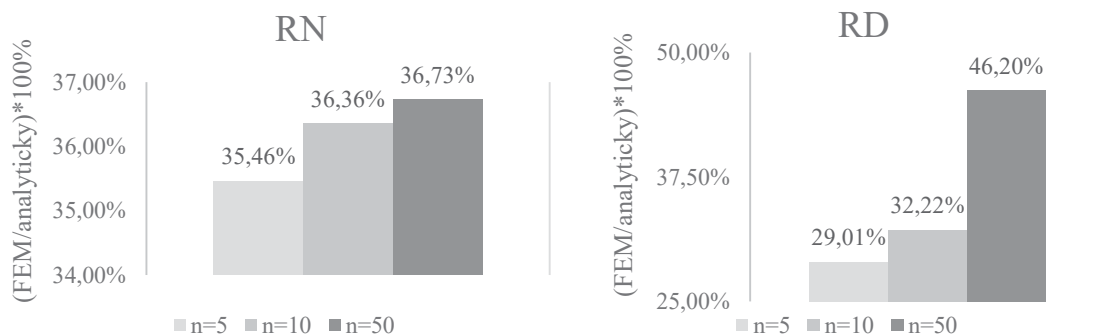
3.2 Tvary plastických zón pri uvážení pružno-plastickeho materiálu

Vyhodnotenie výsledných plastických zón pre *SENB* s uvážením pružno-plastickeho materiálu je graficky znázornené na obr. 6, pre $n=5;10;50$ a porovnané s analytickým riešením z predošlej kapitoly.



Obr. 6: Tvary plastických zón pred koreňom trhliny s uvážením pružno-plastickeho materiálu

Na záver možno porovnať plochu splastizovanej oblasti pre jednotlivé n v stave *RN* a *RD* ako ich percentuálny podiel vzhľadom k analytickému riešeniu.



Obr. 7: Percentuálny podiel plastických zón

Podobné výsledky boli dosiahnuté napríklad v literatúre [8] a [9], možno teda metodiku riešeného problému považovať za správnu.

Záver

Predkladaný príspevok sa venuje stanoveniu plastických zón v blízkom okolí koreňa trhliny. Postupne sú vyhodnotené výsledky pre dvojrozmernú úlohu v podmienkach rovinnej napätosti aj rovinnej deformácie.

V prípade rovinnej úlohy s uvážením lineárne elastického materiálu sú výsledky teoretickej hranice plastickej zóny takmer totožné s analytickým riešením pomocou von Missesovho kritéria plasticity. Pri uvážení pružno-plastického materiálu možno výsledky považovať v dobrej zhode s citovanou literatúrou. V rámci zhodnotenia dosiahnutých výsledkov možno konštatovať, že so zväčšujúcim sa koeficientom spevnenia n sa plastická zóna zväčšuje zväčšuje.

Použitá literatúra

- [1] Williams, M.L., "On the Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack." Journal of Applied Mechanics, Vol. 24, 1957, pp. 109–114.
- [2] ANDERSON T.L.: Fracture mechanics, Fundamentals and Applications, CRC Press, 688s, 1995 ISBN 978-1-4200-5821-5
- [3] ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 17.2, Help System, Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc.
- [4] Kuang, J.H., A displacement extrapolation method for two-dimensional mixed mode crack problems, Engineering Fracture mechanics Vol.46 No. 5, pp.735-741
- [5] Guinea, G.V., KI evaluation by the displacement extrapolation technique, Engineering Fracture Mechanics 66(2000) 243-255
- [6] Qiunghua H., Determination of stress intensity factor for mode I fatigue crack based on finite element analysis, Engineering Fracture Mechanics 138 (2015) 118-126
- [7] Dodds R.H. Jr., Anderson T.L., and Kirk, M.T.: A framework to Correlate a/W Effects on Elastic-Plastic Fracture Toughness (J_c), International Journal of Fracture. Vol.48, 1991, pp.122
- [8] Kudari, Shashidhar & Kodancha, Krishnaraja. (2010). 3D finite element analysis on crack-tip plastic zone. International Journal of Engineering, Science and Technology. 2. 10.4314/ijest.v2i6.63698.
- [9] Narasimhan, Ramarathnam & Y Subramanya, H & Patil, Swapnil & Tandaiya, Parag & Ramamurty, U. (2009). Stationary crack tip fields in elastic-plastic solids: An overview of recent numerical simulations. Journal of Physics D: Applied Physics. 42. 214005. 10.1088/0022-3727/42/21/214005.

Lenka Uhlířová¹

Študijný program: Aplikovaná mechanika, ročník: 4.

SPEKTRÁLNA ANALÝZA PRAVOUHLEJ ODKAĽOVACEJ NÁDRŽE

SPECTRAL ANALYSIS OF THE RECTANGULAR SEDIMENTATION TANK

Abstract

Reinforced concrete tanks are currently used to store various substances and products. Most often they serve as drinking water reservoirs, to sewage treatment or to store various technical fluids. Although rectangular tanks are less used, they have advantages, such as less sensitivity to one-sided loading and better utilization of space when using a group of tanks.

Rectangular tank which is the matter of interest in this paper is for the purposes of analysis considered as fulfilled with water. Dynamic analysis of the tank considering fluid-structure interaction (FSI) was the matter of interest here. Deformations and bending moments of walls were obtained.

Kľúčové slová

Odkal'ovacia nádrž, Dynamická analýza, Vlastné tvary, Spektrum odozvy

1. Úvod

Na riešenie mechaniky kontinua, boli vytvorené 3 numerické metódy (metóda konečných prvkov, metóda konečných pásov a metóda hraničných prvkov). Vďaka vývoju výpočtových programov je najpoužívanejšou metódou metóda konečných prvkov (MKP). Metóda vychádza z variačných princípov. Pre výpočty použité v tomto článku bol použitý program ANSYS Academic.

Pre potreby tohto článku bola namodelovaná pravouhlá odkal'ovacia nádrž, ktorá bude naplnená kalom. Vo výpočte bola zohľadnená interakcia konštrukcie stien nádrže a samotnej kvapaliny. Ako podložie bola zvolená kategória podložia C [1, 2]. V každej oblasti Slovenska sú definované hodnoty základného seizmického zrýchlenia (t. j. $a_{gR} = 0,40 \text{ m/s}^2; 0,63 \text{ m/s}^2; 0,86 \text{ m/s}^2; 1,10 \text{ m/s}^2$) podľa normy STN EN 1998-1 [2].

Pre výpočet výsledkov spôsobených dynamickým zaťažením nádrže bola použitá metóda spektier odozvy. Zo získaných výsledkov nás zaujíma deformácia nádrže od seizmického zaťaženia, ako aj veľkosť merných momentov v stenách nádrže.

2. Metóda spektier odozvy

Metóda spektier odozvy je popísaná v [1]. Pre výpočet seizmického zaťaženia je často používanou metódou riešenia.

V modálnej analýze pri riešení vlastných čísel získame vlastné frekvencie (f_i) a k nim aj príslušné vlastné tvary. Pre daný smer budenia (x, y, z) sa vypočíta participačný faktor γ_i (1) každého vlastného tvaru, ktorý vyjadruje, akým podielom prispieva vlastný tvar do jednotlivých globálnych smerov.

¹ Ing. Lenka Uhlířová, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

$$\gamma_i = \Phi_i^T M d \quad (1)$$

Φ_i – normovaný i-tý tvar kmitania

M – matica hmotnosti

d – vektor opisujúci smer budenia

Pri výpočte modálneho faktora (A_i) postupujeme podľa vzťahu (2). Potom je možné podľa vzťahov uvedených v norme [2] vypočítať pre každý vlastný tvar a jeho frekvenciu príslušné zrýchlenie (S_{ai}):

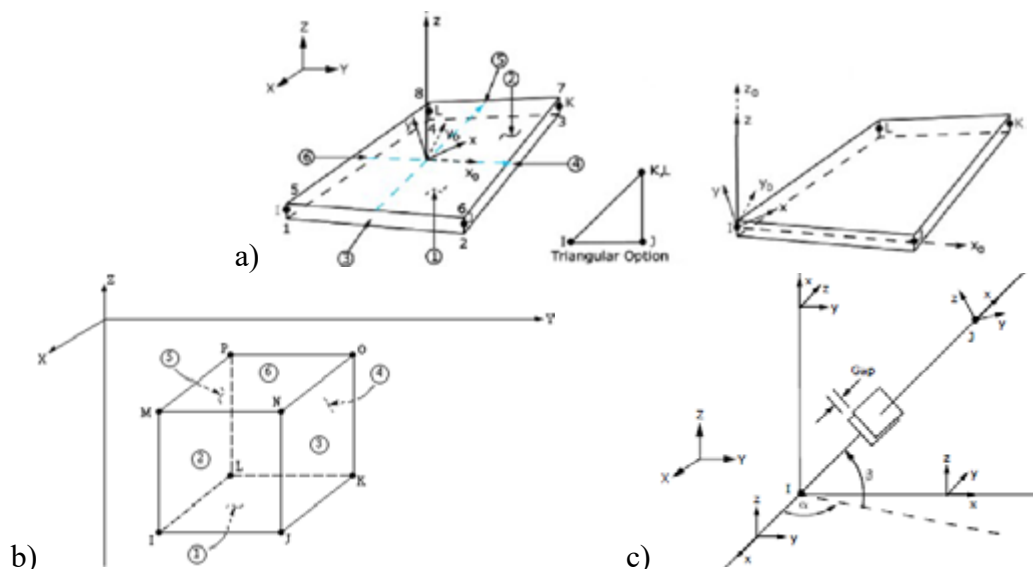
$$A_i = \frac{S_{ai} \times \gamma_i}{\omega_i^2} \quad (2)$$

V príklade využívame 2 smery budenia konštrukcie - v smere osi x a y. Výsledky z modálnej analýzy sú v Kapitole 4 a výsledky spektrálnej analýzy v Kapitole 5.

3. Model nádrže

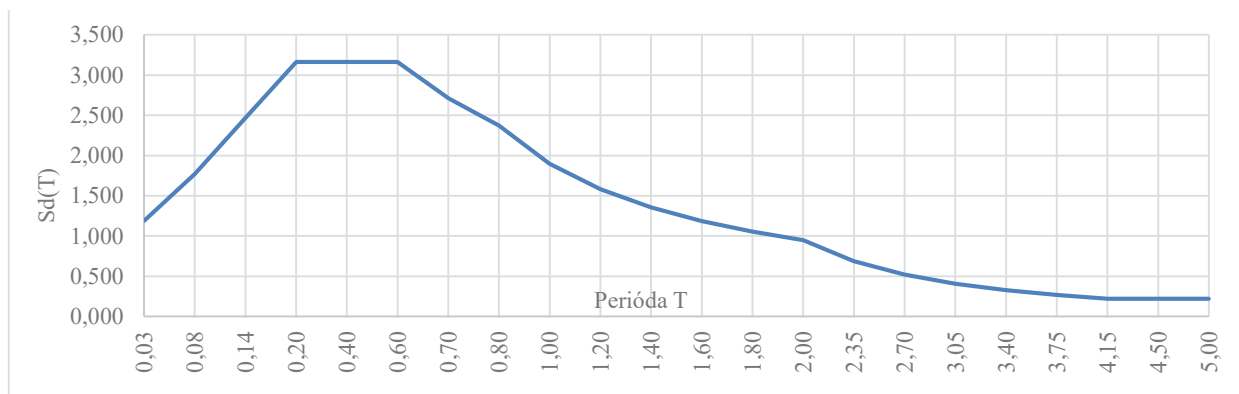
Samotná nádrž je modelovaná ako pravouhlá, s pôdorysnými rozmermi 11 m x 7,5 m a s výškou 2 m. Hrúbka stien je 200 mm a hrúbka dna nádrže 500mm. Vodný stĺpec dosahuje výšku 1,5 m. Nádrž je nadzemná, železobetónová (betón je triedy C25/30, E=31 GPa). Základová doska je na úrovni terénu pevne spojená so základovou pôdou.

Pre zohľadnenie interakcie konštrukcie a kvapalnej náplne bol medzi elementy stien nádrže (SHELL181 – Obr. 1a) a elementy vody (FLUID80 – Obr. 1b) vložený medziľahlý element (CONTAC52 – Obr. 1c). Tento medziľahlý element je kontaktný prvok zohľadňujúci vplyv FSI. Problematike interakcie konštrukcie a podložia sa venujú aj [3], [4] a [5].



Obr. 1 a) Štvoruholníkový 3D škrupinový prvok SHELL181 [6] b) Kvapalinový 3D element FLUID80 [6] c) Kontaktný prvok CONTAC52 [6]

Jedno zo spektier odozvy použitých vo výpočte je na Obr. 2. Ide o spektrum odozvy pri podloží kategórie C a v oblasti s hodnotou seizmického zrýchlenia $a_{gR} = 1,10 \text{ m/s}^2$.



Obr. 2: Spektrum odozvy – Typ spektra 1

4. Výsledky modálnej analýzy

Z modálnej analýzy sme získali vlastné tvary, ich frekvencie, aj hodnoty participačného faktora.

Bolo potrebné oddeliť vlastné tvary, pri ktorých dochádza len k zvlnieniu hladiny vody od vlastných tvarov, pri ktorých kmitá aj samotná konštrukcia nádrže. Prvých 6 vlastných tvarov aj s hodnotami frekvencií a participačného faktora sú v tabuľke 1.

Tabuľka 1: Hodnoty frekvencií a participačného faktora deformácie vlastných tvarov nádrže

| Vlastný tvar č. | Frekvencia f | Participačný faktor γ | Smer γ |
|-----------------|--------------|------------------------------|---------------|
| 1 | 28,970 Hz | -5,429 | Rot. X |
| 2 | 29,056 Hz | -25,510 | Rot. Z |
| 3 | 32,116 Hz | 13,956 | Rot. Z |
| 4 | 32,451 Hz | -6,345 | Rot. X |
| 5 | 36,482 Hz | -13,508 | Rot. Z |
| 6 | 37,019 Hz | -5,252 | Rot. X |

5. Výsledky spektrálnej analýzy

Po získaní výsledkov z modálnej analýzy nasleduje spektrálna analýza, aby sme zistili vplyv seizmického zaťaženia od návrhového spektra odozvy. Toto budiace spektrum (Obr. 2) je typu 1 (epicentrum zemetrasenia je od konštrukcie vzdialené) podľa [2].

Výpočet prebehol samostatne pre všetky štyri typy oblastí seizmického zaťaženia na Slovensku. Hodnoty základného seizmického zrýchlenia určeného na území Slovenska sú $0,40 \text{ m/s}^2$; $0,63 \text{ m/s}^2$; $0,86 \text{ m/s}^2$ a $1,10 \text{ m/s}^2$.

Výsledky sú zhrnuté v porovnávacích tabuľkách 2 a 3.

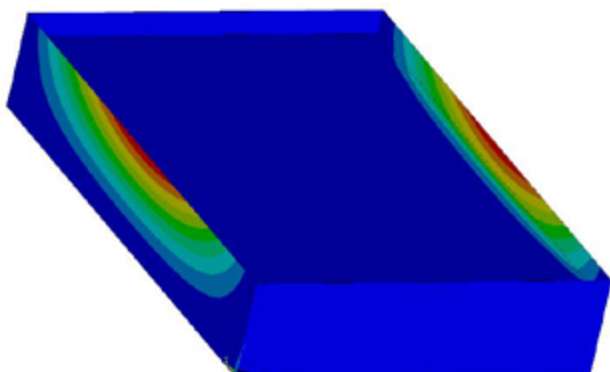
Tabuľka 2: Porovnanie výsledkov spektrálnej analýzy pre budenie v smere osi x

| $a_{gR} [\text{m/s}^2]$ | $u_x [\text{mm}]$ | $u_y [\text{mm}]$ | $u [\text{mm}]$ | $m_x [\text{kNm/m}]$ | $m_y [\text{kNm/m}]$ |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| 0,40 | 0,084 | 0,008 | 0,084 | 0,415 | 1,704 |
| 0,63 | 0,133 | 0,012 | 0,133 | 0,654 | 2,684 |
| 0,86 | 0,181 | 0,017 | 0,181 | 0,893 | 3,665 |
| 1,10 | 0,231 | 0,022 | 0,231 | 1,143 | 4,688 |

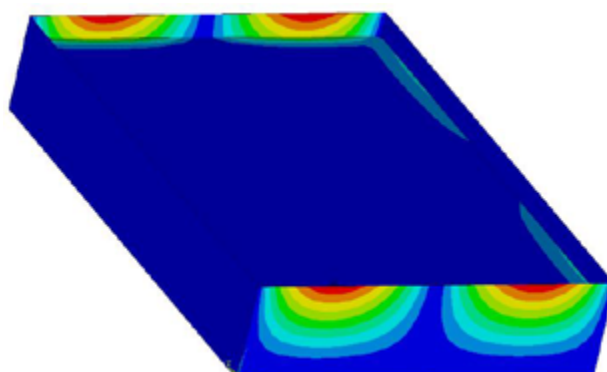
Pre oblasť so základným seizmickým zrýchlením $a_{gR} = 1,10 \text{ m/s}^2$ (Obr. 2) pôsobiace v smere osi x sú na obrázkoch 3 – 6 zobrazené deformácie nádrže a merné momenty v stenách nádrže získané seizmickou analýzou. Ostatné hodnoty sú v tabuľke 2.

Na obrázkoch deformácií je vidieť, že ak zaťaženie pôsobí v smere osi x , tak na stenách v smere tohto pôsobenia (kratsie steny) vzniká jednoduchá vlna znázorňujúca deformáciu. Na stenách kolmých na smer pôsobenia zaťaženia (dlhšie steny) vzniká polvlna.

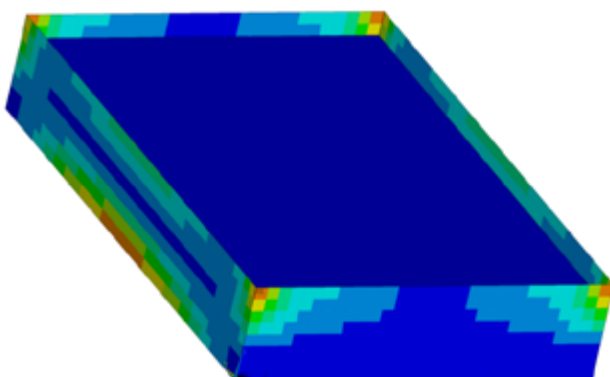
Na obrázkoch merných momentov v stenách vidíme, že ak zaťaženie pôsobí v smere osi x , tak maximálny merný moment m_y vzniká v mieste votknutia, v strede dĺžky stien kolmých na smer pôsobenia zaťaženia (dlhšie steny). Maximálny merný moment m_x vzniká v hornom rohu stien.



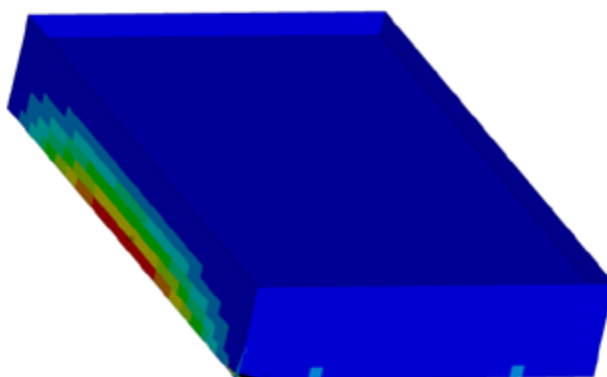
Obr. 3: Deformácia v smere osi x od seizmického zaťaženia pôsobiaceho v osi x s maximálnou hodnotou v červenej oblasti $0,231 \text{ mm}$



Obr. 4: Deformácia v smere osi y od seizmického zaťaženia pôsobiaceho v osi x s maximálnou hodnotou v červenej oblasti $0,022 \text{ mm}$



Obr. 5: Merné momenty m_x od seizmického zaťaženia pôsobiaceho v osi x s maximálnou hodnotou v červenej oblasti $1,143 \text{ kNm/m}$



Obr. 6: Merné momenty m_y od seizmického zaťaženia pôsobiaceho v osi x s maximálnou hodnotou v červenej oblasti $4,688 \text{ kNm/m}$

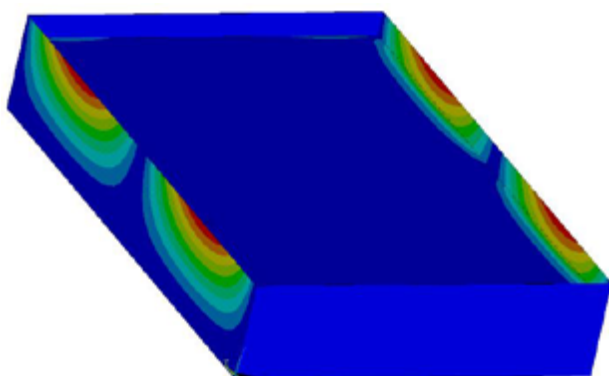
Table 3. Porovnanie výsledkov spektrálnej analýzy pre budenie v smere osi y

| $a_{gr} [\text{m/s}^2]$ | $u_x [\text{mm}]$ | $u_y [\text{mm}]$ | $u [\text{mm}]$ | $m_x [\text{kNm/m}]$ | $m_y [\text{kNm/m}]$ |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| 0,40 | 0,017 | 0,065 | 0,065 | 0,425 | 1,379 |
| 0,63 | 0,026 | 0,102 | 0,102 | 0,670 | 2,172 |
| 0,86 | 0,036 | 0,140 | 0,140 | 0,914 | 2,965 |
| 1,10 | 0,046 | 0,179 | 0,179 | 1,169 | 3,793 |

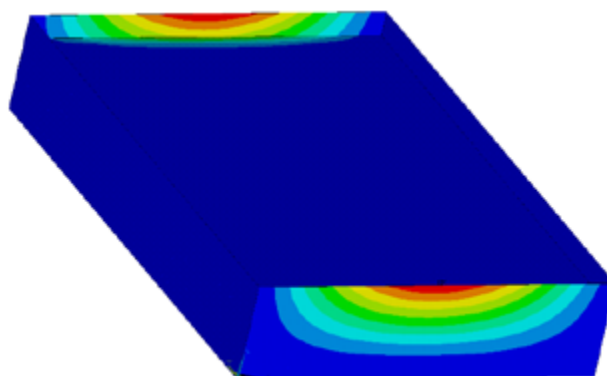
Pre oblasť so základným seizmickým zrýchlením $a_{gR} = 1,10 \text{ m/s}^2$ (Obr. 2) pôsobiace v smere osi y sú na obrázkoch 7 – 10 zobrazené deformácie nádrže a merné momenty v stenách nádrže získané seizmickou analýzou. Ostatné hodnoty sú v tabuľke 3.

Na obrázkoch deformácií je vidieť, že ak zaťaženie pôsobí v smere osi y , tak na stenách v smere tohto pôsobenia (dlhšie steny) vzniká jednoduchá vlna znázorňujúca deformáciu. Na stenách kolmých na smer pôsobenia zaťaženia (kratšie steny) vzniká polvlna.

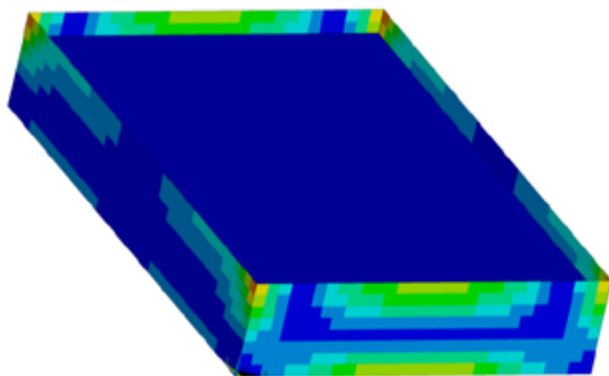
Na obrázkoch merných momentov v stenách vidíme, že ak zaťaženie pôsobí v smere osi y , tak maximálny merný moment m_y vzniká v mieste votknutia, v strede dĺžky stien kolmých na smer pôsobenia zaťaženia (kratšie steny). Maximálny merný moment m_x vzniká v strede hornej hrany kratších stien.



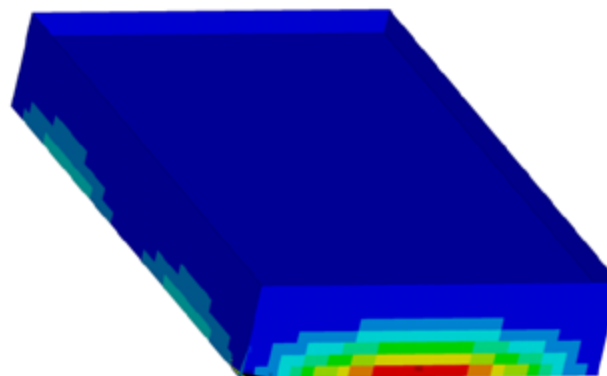
Obr. 7: Deformácia v smere osi x od seizmického zaťaženia pôsobiaceho v osi y s maximálnou hodnotou v červenej oblasti $0,046 \text{ mm}$



Obr. 8: Deformácia v smere osi y od seizmického zaťaženia pôsobiaceho v osi y s maximálnou hodnotou v červenej oblasti $0,179 \text{ mm}$



Obr. 9: Merné momenty m_x od seizmického zaťaženia pôsobiaceho v osi y s maximálnou hodnotou v červenej oblasti $1,169 \text{ kNm/m}$



Obr. 10: Merné momenty m_y od seizmického zaťaženia pôsobiaceho v osi y s maximálnou hodnotou v červenej oblasti $3,793 \text{ kNm/m}$

Uvedené výsledky sú výsledkami len od seizmického zaťaženia. Kompletný statický návrh a posúdenie konštrukcie je ale nutné posúdiť podľa normy STN EN 1991-1-1. kombinácia zaťažení, ktorá slúži na tento posudok, je podľa vzorca (3) pre mimoriadnu seizmickú situáciu.

$$\sum G_{kj} \text{ "+" } \gamma_I \cdot A_{Ed} \text{ "+" } P_k \text{ "+" } \sum \Psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad (3)$$

G_{kj} - charakteristická hodnota stáleho zaťaženia

γ_I - súčiniteľ významnosti konštrukcie

A_{Ed} - návrhová hodnota seizmického zaťaženia

Ψ_{2i} - kombinačný koeficient pre kvázistálu hodnotu premenného zaťaženia

Q_{ki} - charakteristická hodnota premenného zaťaženia

Pri vytváraní kombinácie na posúdenie vplyvu seizmického zaťaženia na konštrukciu používame charakteristické hodnoty stáleho a premenného zaťaženia, len seizmické zaťaženie použijeme v jeho návrhovej hodnote.

Literatúra

[1] SOKOL, M. – TVRDÁ, K. Dynamika stavebných konštrukcií. Bratislava: STU v Bratislave 2011, s. 212. ISBN 978-80-227-3587-2.

[2] STN EN 1998-1 Eurokód 8: Navrhovanie konštrukcií na seizmickú odolnosť. Časť 1: Všeobecné pravidlá, seizmické zaťaženia a pravidlá pre budovy (STN 73 0036). Bratislava: SÚTN 2005, s. 229 + NA/Z2

[3] KOTRASOVÁ, K. - KORMANÍKOVÁ, E. A case study on seismic behavior of rectangular tanks considering fluid-structure interaction. In International Journal of Mechanics, 2016, Vol. 10, pp. 242-252. ISSN 1998-4448.

[4] KOTRASOVÁ, K. - KORMANÍKOVÁ, E. Effect of Fluid in the moving container. In Journal of Numerical analysis, Industrial and Applied Mathematics. 2006, Vol. 1, pp. 1-9. ISSN 1790-8140.

[5] KALA, J. – SALAJKA, V. – HRADIL, P. Response of water tower on wind induced vibration considering interaction of fluid and structure. In ICETI 2012: 2nd International Conference on Engineering and Technology Innovation, 2-6 November, 2012, Taiwan, pp 1269-1272.

[6] ANSYS Help, Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications (ANSYS manual).

Vzor popisu použitej literatúry

1. Knihy / Monografie

SOKOL, M. – TVRDÁ, K. Dynamika stavebných konštrukcií. Bratislava: STU v Bratislave 2011, s. 212. ISBN 978-80-227-3587-2.

2. Normy a návody

STN EN 1998-1 Eurokód 8: Navrhovanie konštrukcií na seizmickú odolnosť. Časť 1: Všeobecné pravidlá, seizmické zaťaženia a pravidlá pre budovy (STN 73 0036). Bratislava: SÚTN 2005, s. 229 + NA/Z2

[6] ANSYS Help, Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications (ANSYS manual).

3. Článok zo zborníka a monografie

KOTRASOVÁ, K. - KORMANÍKOVÁ, E. A case study on seismic behavior of rectangular tanks considering fluid-structure interaction. In International Journal of Mechanics, 2016, Vol. 10, pp. 242-252. ISSN 1998-4448.

KOTRASOVÁ, K. - KORMANÍKOVÁ, E. Effect of Fluid in the moving container. In Journal of Numerical analysis, Industrial and Applied Mathematics. 2006, Vol. 1, pp. 1-9. ISSN 1790-8140.

KALA, J. – SALAJKA, V. – HRADIL, P. Response of water tower on wind induced vibration considering interaction of fluid and structure. In ICETI 2012: 2nd International Conference on Engineering and Technology Innovation, 2-6 November, 2012, Taiwan, pp 1269-1272.

BUILDING TECHNOLOGY

Bader Alamro¹

Študijný program: Technológia stavieb, ročník: 4

VYŠŠIE FORMY MANAŽÉRSTVA KVALITY V STAVEBNEJ FIRME

HIGHER FORMS OF QUALITY MANAGEMENT IN CONSTRUCTION COMPANY

Abstract

It is often said that quality is one of the most important factors of market competition. However, quality does not include only product or service features but also quality of business systems, quality of management, quality of relationships with partners, quality of effective production methods, quality of sales and related services, quality of distribution and quality of company culture. In my contribution are described specific features for higher levels of Quality Management, like Total Quality Management, KAIZEN method, Reengineering and EFQM Excellence Model, which can be effectively implemented into construction companies with aim of continuing improvement of their Quality Management. Achievement of exceptional quality is now considered a necessity if an organization wants to succeed in a market in a hard competitive fight. Quality management forms mentioned in the contribution represent a significant help for construction organizations in this effort.

1. Introduction

In the course of history, quality and quality management has undergone a long development process. From self-control of own products (manufacturers of tools, craftsmen) through specialized controllers (manufactories and factories of the Industrial Age) to statistical quality control methods (influential pioneers: Shewhart, Ishikawa); from product quality to quality of all business processes; from development of revolutionary philosophies, principles and methods (works of prominent quality experts: Deming, Juran, Crosby, Feigenbaum) to their worldwide acceptance in the form of stable, respected systems and defined standards (Total Quality Management - TQM, Quality management systems according to ISO 9001, Kaizen, Six Sigma, EFQM Excellence Model).

Quality Management is part of management of the organization. The role of quality management is to draw up and implement policies, principles and requirements for quality in the organization. It has four main components: quality planning, quality assurance, quality control and quality improvement. Quality Management activities include for example data analysis, monitoring of performance and reliability of processes, recording achievement of goals, customer satisfaction analysis, etc. Quality management pertains not only to products and services but also to company management and strategy. Essential aspects of contemporary quality management include:

- strong management with a clear vision and policy of quality in the organization,
- effort to implement processes and their products correctly at first attempt,
- active involvement of all organization members in the quality improvement process and process effectivity growth,
- customer focus (product or service user),
- implementation of a team-work system and self-control system,
- implementation of a system of incentives and bonuses for achieved results,

¹Bader Alamro, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

- continual process of employee trainings in the organization.

In my contribution are described specific features for higher levels of Quality Management, like Total Quality Management, KAIZEN method, reengineering philosophy and EFQM excellence model, which can be effectively implemented into construction companies with aim of continuing improvement of their Quality Management.

Implementation of the Quality Management System (QMS) in the organization is a milestone which clearly confirms achievement of a certain quality standard. However, the process of quality improvement does not end with achievement of this standard; on the contrary, it is the first step on the path to excellence. Higher quality management forms are a superstructure built on a firm base formed by the QMS. The following picture (Figure 1) shows methods of increasing the level of quality management in relation to time (reengineering means a radical change of corporate processes whereas Kaizen, for instance, means gradual improvement step by step).

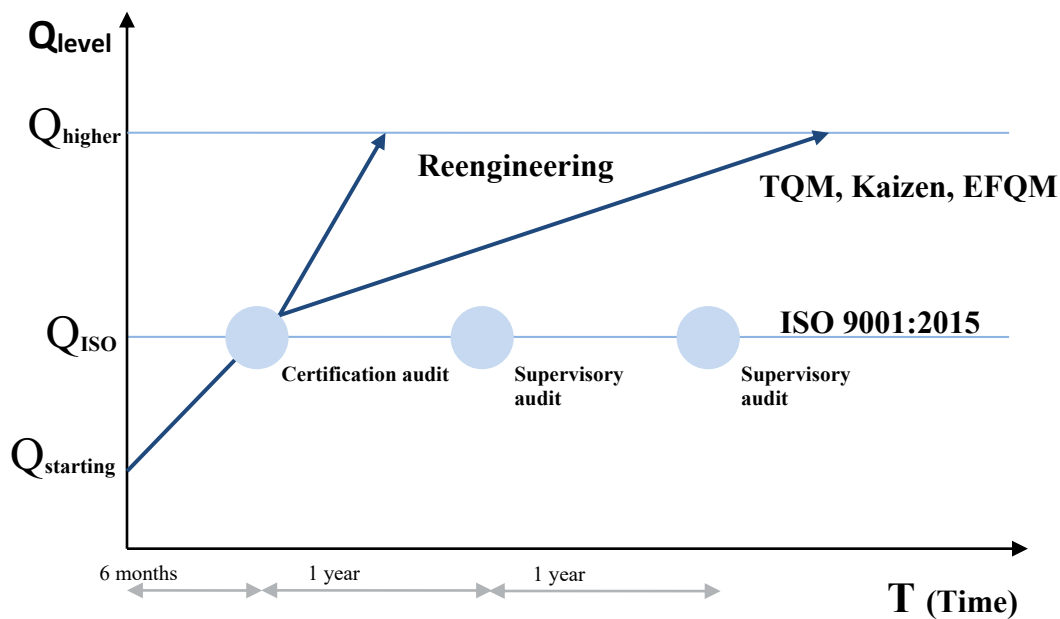


Figure 1: Quality management levels in time

2. Total Quality Management (TQM)

TQM is an attitude, philosophy but also a process which emphasizes personal responsibility of all employees striving for continual improvement. The process as such has no end. TQM is also a system composed of organizational, administrative and technical procedures, techniques and tools. The basic TQM concept focuses on customers, employees of the organization, processes, working environment, goals and results, and forms a basis of ISO 9000 standard series and of the EFQM model.

Total Quality Management can be defined as follows: TQM is a quality-focused approach of the organization's management based on involvement of all its members and aimed at sustained success achieved through satisfied customers, prosperity of the entire organization and profit for all members of the organization [2].

Basic TQM principles:

- Customer focus: The customer is a key arbiter in terms of quality of products and services. The organization should understand their present and future needs, meet their requirements and exceed their expectations.
- Development of partnerships: Partnerships with suppliers are based on mutual trust and appropriate integration, which generates an added value for both customers and suppliers.
- Employee development and involvement: Total employee potential is achieved through shared values, fostering mutual trust and facilitating initiative. Involving employees and communicating with them allows the organization to benefit from their skills and abilities.
- Fact-based process management: Activities are systematically managed in terms of processes. Processes have owners, are understood and prevention-based improvement activities are carried out in the daily work of each employee. Management is based on facts, measurements and information.
- Continual learning, innovations and improvement: There is a culture of continual improvement. The process is based on sustained improvement of the level of knowledge. Original ideas and innovations are supported. Benchmarking (comparison with market leaders) is used to foster innovations and improvement.
- Leadership and Stability of Intentions: Leaders develop corporate culture and steer resources and goals of the organization towards excellence. Policies, strategies and goals are disseminated in a structured and systematic way throughout the organization and all activities are mutually compatible. Employee behaviour is also in accordance with policies and strategies of the organization.
- Public responsibility: The organization and its employees adopt an ethical approach and seek to meet regulatory and statutory requirements beyond standard levels.
- Result orientation: Sustained success depends on balancing and satisfying the interests of all stakeholders: customers, suppliers, employees and those having a financial stake in the organization. Excellence means achievement of results that satisfy all stakeholders.

TQM requires a change in attitudes and behaviour of employees of the organization in relation to internal and external customers and controlled and coordinated fulfilment of obligations. TQM effects can be divided as follows:

- direct: minimizing poor-quality production, minimizing costs of repairs, reconstructions, etc.,
- indirect: increase of customer confidence in the organization, revealing hidden potential of individuals, improvement of corporate culture.

3. Kaizen

Kaizen is a philosophy of continual improvement, which originated in Japan and has been widely used in Japanese companies since the 1950s. The word Kaizen means improvement in Japanese (KAI – improvement, ZEN – continuing). Improvement is achieved through gradual and constant steps involving all employees from managers through operation supervisors to workers. It does not matter where and when improvement is achieved in the organization; in the end, it always leads to improved production quality [1].

Although Kaizen is based on features typical for the Japanese mentality, it is used increasingly often all around the world. Kaizen is an important tool which can help construction companies to solve problems such as low productivity, non-system management or low work efficiency.

Basic Kaizen principles include: customer orientation, application of TQM philosophy, massive employee initiative, employee orientation and employee performance increase, employees own and co-create corporate values, process automation and robotics, quality circles aimed at continual improvement of quality of products and processes, discipline at workplace, full equipment

maintenance, improvement of all processes in the value chain of corporate activities, minimizing stock and effective cooperation and system of incentives.

The Kaizen method rests on the following principles: attention is paid to every improvement, all employees participate in improvement of products and processes, every improvement is analysed, positive and negative impact is reviewed, task of managements: development, maintenance and improvement of standards, frequent meetings in order to solve problems, strong top-down support, active bottom-up work, motivation in improvement efforts and rewarding employee creativity.

4. Reengineering

Reengineering is a fundamental rethinking of existing processes in the organization and focuses on innovation of processes and achievement of extraordinary effects. Business Process Reengineering is a radical change enabling rapid progress in quality assurance. Reengineering was first introduced in the 1990s by Michael Hammer and James Champy at the Massachusetts Institute of Technology. Hammer and Champy defined Reengineering as follows: *Reengineering is the fundamental rethinking and radical reconstruction of business processes to achieve dramatic improvements in critical measures of performance such as cost, quality and speed [3].*

Reengineering requires radical reconstruction of business processes of the construction organization. Even though reengineering begins with new process projecting, it certainly does not end with that. Fundamental changes in business processes affect all other parts and aspects of the organization. Job functions are transformed from a narrow and task-oriented concept to a versatile concept. People who used to work according to instructions have now a right to choose and make their own decisions. Assembly line work disappears. Existence of functional units is no longer necessary. Managers become coaches. Employees focus on customer needs rather than on the needs of their bosses. Virtually every aspect of the organization is transformed.

The concept of fundamental changes in activities and approaches in all selected areas can be characterized as follows:

- tailored customer satisfaction,
- multi-unit cooperation (within the organization) and cooperation between external partners,
- care for individual employee development (special care for top employees),
- disruption of management hierarchy (cooperation and participation of all employees, remuneration according to assets generated for the company, elimination of differences between employers and employees),
- innovation of each area by each employee through initiative (permanent application of qualified methods and techniques),
- application of progressive procedures and technology,
- disappearance of formal quality management systems,
- results of the organization's activities beneficial for the whole society,
- full acceptance of the environmental aspects of business.

Reengineering as a management method can be characterized as follows:

- business processes are the object of changes; they are considered outside the current organizational structure and in terms of customer added value,
- changes are fundamental and radical,
- changes lead to a new arrangement of the logistic chain,
- top management of the organization is the owner of changes because subordinate departments are not able to handle this task in a satisfactory way.

Reengineering brings major changes also to corporate culture. It requires that employees firmly believe that they work for their customers, not for their bosses. They will believe it only to the extent to which this conviction will be supported by corporate remuneration schemes. If these values do not change, new processes will not work. Changing values is just as important as changing processes.

5. EFQM Excellence model

The EFQM excellence model was developed by the European Foundation for Quality Management with the aim to provide a single structured framework for self-evaluation of performance of the organization and to introduce a versatile quality management tool for seeking possibilities of continual improvement of the construction organization on its road to excellence. The EFQM Model constitutes a basis for assessment and evaluation of businesses aspiring to the European Quality Award (EQA) and to the National Quality Award. The EFQM Model can be applied in any organization in the business sector as well as in public administration (however, the Common Assessment Framework (CAF) is intended primarily for public administration). Nowadays, many companies use this model as their internal methodology to measure their own performance. The EFQM Model is based on nine criteria. The first five criteria are Enablers (what the organization has), the other four are Results (what the organization achieves). Each criterion is further divided into sub-criteria – altogether there are 32 sub-criteria. The scheme of the EFQM Model and the points that can be obtained for each criterion can be seen in Figure 2. The direction of the arrows shows the dynamic nature of the model. Learning, creativity and innovation help to improve Enablers which then lead to improvement of Results. This process is constant.

Achievement of a higher quality level and economic prosperity of the construction organization are not the only benefits of the EFQM Model. It encourages application of approaches in line with moral and ethical values and principles of responsibility. It also encourages organizations to come up with a vision including these values and leads to responsibility towards the society as a whole – environment, region, etc., emphasizing positive public image of the organization. Based on the knowledge in the field of quality management gained from literature and from practical experience, the following main benefits of the EFQM Model and its application in the organization can be formulated: complexity, versatility, excellence as a goal, possibility of self-evaluation, compatibility with ISO 9000 standards, European and global dimension, flexibility in application, integration of improvement methods and systems, links to quality awards. The Deming PDCA cycle and comparison with industry leaders are useful tools in application of the EFQM Model methodology and self-evaluation.

Conclusion

This contribution analyses the most significant higher forms of quality management that can be applied in construction organizations. The Quality Management System according to ISO 9001:2015 is an internationally recognized standard which increases credibility in the eyes of customers and other business entities and boosts chances of being successful in tenders. The QMS is a strong pillar for application of higher quality management forms such as TQM, Kaizen, Reengineering and EFQM Model.

Total Quality Management (TQM) and Kaizen focus on gradual and sustained improvement of quality of products and processes and they represent a superstructure of the implemented Quality Management System and are highly compatible with its principles. Reengineering is a fundamental rethinking of existing processes in the organization and focuses on innovation of processes and achievement of extraordinary effects.

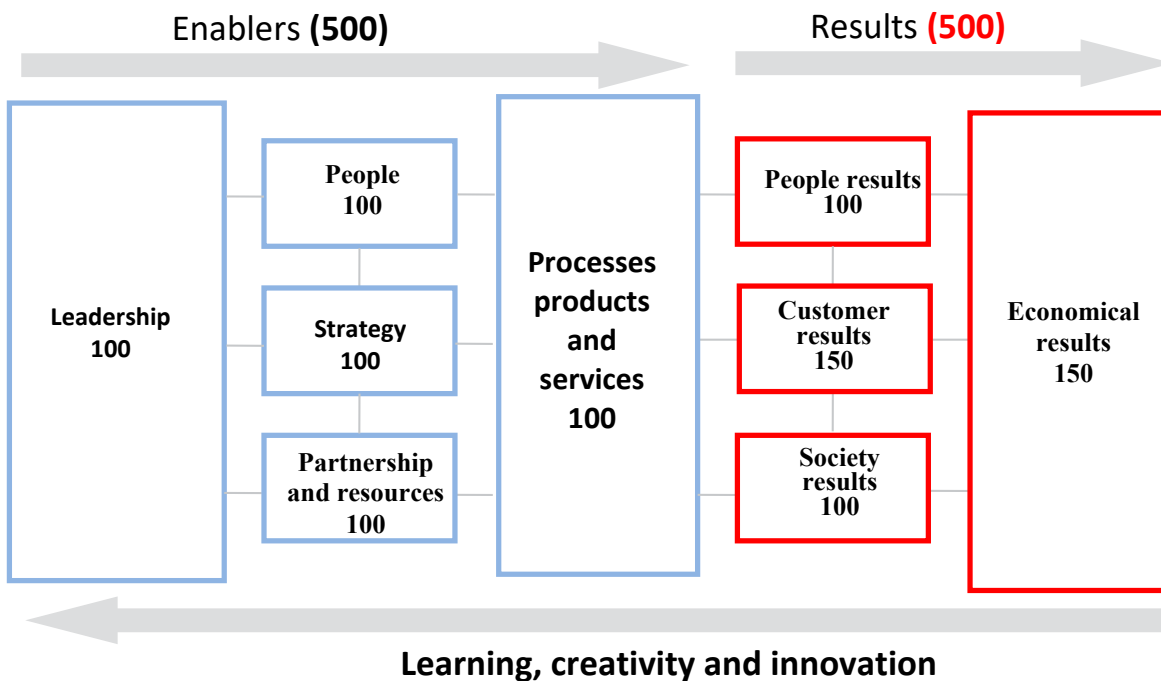


Figure 2: EFQM model scheme with the score for the criteria [4]

The EFQM Model was being implemented by the organization in previous years mainly to obtain awards for quality (e.g. European Quality Award), but as our findings indicate, this model is universally usable also as an great internal tool for company's self-evaluation and for comprehensive, continuous improvement of organization on all levels.

Achievement of exceptional quality is now considered a necessity if an construction organization wants to succeed in a market in a hard competitive fight. Quality management forms mentioned in the chapters of this book represent a significant help for organizations in this effort. It is a long-term process, which begins with great strategic decision and continues as persistent, purposeful attitude of management and all the people participating on construction company's life. This paper is written as my research activity in project VEGA N. 1597

References

[1] GAŠPARÍK, J. & GAŠPARÍK, M. *Quality Management in Organizations*, TRIBUN EU, Brno, 2016

[2] OAKLAND, J. S. *Total Quality Management*, ELSEVIER LTD, , OXFORD, 2003

[3] HAMMER, M. & CHAMPY, J. *Reengineering – A manifesto for Business Revolution*, HARPER COLLINS PUBLISHER INC., New York, 1993

[4] GAŠPARÍK, J. : EFQM. 2003. *Introducing excellence*. BRUSSELS EFQM, 16 P. ISBN 90-5236-072, 2003

Barbora Belániová¹

Študijný program: Technológie stavieb (3.stupeň), ročník: 4.

POZOROVANIE PODMIENOK ROZVOJA BOKORÓZIE V KONŠTRUKCII „DOUBLE ETICS“ POMOCOU EXPERIMENTÁLNEHO SKÚŠANIA

OBSERVATION OF THE CONDITIONS FOR THE DEVELOPMENT OF BIOCOROSION IN THE „DOUBLE ETICS“ STRUCTURE BY EXPERIMENTAL TESTING

Abstract

The paper is a continuation of the investigation of the impact of the application of the double thermal insulation technology in terms of the possibility of survival and development of biocorrosion in the formation of original and new thermal insulation structures. The focus of the paper is to evaluate a preparatory phase of the experiment and to record the temperature and humidity parameters. Based on these values, it is possible to verify the creation of suitable humidity and temperature conditions for the development of microorganisms in the “Double ETICS” stack on the original surface of the contaminated facade. The aim of the experiment is to evaluate the applied samples in terms of the substrate preparation needs - the original construction of ETICS with microorganisms - before applying the "Double ETICS" technology.

Kľúčové slová

vlhkostné podmienky, degradácia povrchu, biokorózia, technológia zdvojeného zateplenia, experimentálne skúšanie

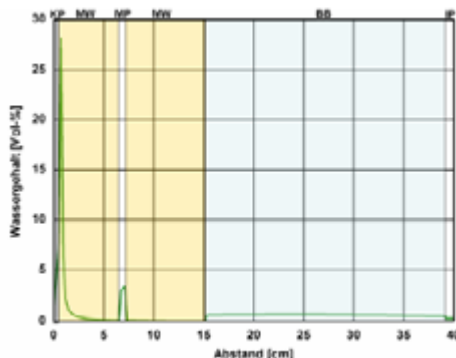
1. Obnova existujúceho ETICS konštrukciou zdvojeného zateplenia „Double ETICS

Viacero výskumov sa zaoberá sledovaním hygrotermálneho správania fasády [1] a novými riešeniami obnovy napadnutých fasád biokoróziou [2,3]. Je známe [4], že mikrobiálna aktivita má závažný vplyv na trvanlivosť stavebných materiálov nie len na zateplovací systém. Z praktického hľadiska, podľa [5] je potrebné riešiť identifikáciu všetkých symptómov, ktoré majú vplyv na vznik mikroorganizmov na omietkach súčasného typu. Vyžaduje si to vývoj metód na sledovanie stavu povrchu fasády v čase a vývoj metód ich odstraňovanie. Dnešná situácia technológií pre odstránenie biologického napadnutia kontaktných zateplovacích systémov a ich životnosti nie je veľmi priaznivá. Nakoľko doteraz využívané metódy sú účinné len krátkodobo s potrebou pravidelného opakovania, úlohou výskumu je stanovenie a overenie vhodnej technológie pre trvalé riešenie biokorózie.

Efektívnym novým riešením pre elimináciu mikroorganizmov na povrchu zateplovacích systémov môže byť rozvíjajúca sa radikálna technológia a zároveň obnova existujúcej konštrukcie ETICS - technológia zdvojeného zateplenia („Double ETICS“). Na začiatku výskumu technológie „Double ETICS“ boli vykonané rozbery alternatívnych riešení konštrukcií zdvojeného zateplenia. Bolo potrebné zistiť tepelno-technické a vlhkostné parametre v súvrství zdvojenej konštrukcie. [6] Z teoretických výpočtov [7] a z podľa predchádzajúcich výskumov [8,9] vyplýva, že pri ideálnom stave realizácie a dodržaní všetkých technologických pravidiel je teoreticky možný vznik vhodných vlhkostných pomerov pre rozvoj mikroorganizmov v štrbinách medzi pôvodným podkladom a novým zateplením. Príkladom je aj výskum [10], v ktorom sa dlhodobo sledovala kondenzácia vodných pár

¹ Barbora, Belániová, Ing., STU, Stavebná fakulta, Katedra technológie stavieb, Radlinského

v súvrství konštrukcie ETICS, a zisťovali sa miesta, kde by mohlo nastať hromadenie vlhkosti. Na porovnanie výsledkov výskumu sa použili rôzne druhy a hrúbky konštrukcií a tepelných izolácií. Výsledky výskumu ukazujú, že môže dôjsť k dlhodobému akumulovaniu vlhkosti v zdvojenom systéme ETICS, vid'. obr. 2. Dlhodobo vyskytujúce vlhkostné podmienky v súvrství vytvárajú priaznivý stav pre rozvoj mikroorganizmov na pôvodnej omietke ETICS, ktoré môžu byť rozvíjané v novom súvrství z pôvodnej omietky.



Obr. 1: Obsah vlhkosti v súvrství „Double ETICS“ po 5 rokoch od realizácie [10]

2. Experimentálne overenie rizika rozvoja biokorózie v „Double ETICS“

Zisťovanie možnosti aplikácie technológie zdvojeného zateplenia na pôvodný ETICS z hľadiska vhodných podmienok pre prežitie a rozvoj biokorózie v súvrství, pozostávalo z troch základných krokov:

- z prípravy vzoriek
- zo zaznamenávania teplotných a vlhkostných parametrov
- z vyhodnotenia vzoriek

Riziko vzniku priaznivých podmienok pre rozvoj mikroorganizmov bolo overované experimentom in situ a výsledky budú porovnávané s teoretickými výpočtami zo simulovaných situácií. V rámci experimentu boli vzorky dodatočného zateplenia umiestnené priamo na vybranom bytovom dome s mikroorganizmami, na pôvodnom zateplení. Bytový dom je situovaný v Hlohovci. Na severnej časti fasády je v značnom rozložení viditeľná biokoróziou v podobe machov, rias zeleného sfarbenia, vid'. obr.2.



Obr. 2: Detail znečistenia fasády [autor]

2.1 Príprava vzoriek

Vzorky novej konštrukcie ETICS z novodobých izolačných dosiek Capatect Dalmatin s omietkami novej generácie s vysokou odolnosťou voči biologickým atakom vo veľkosti 30 x 30 cm,

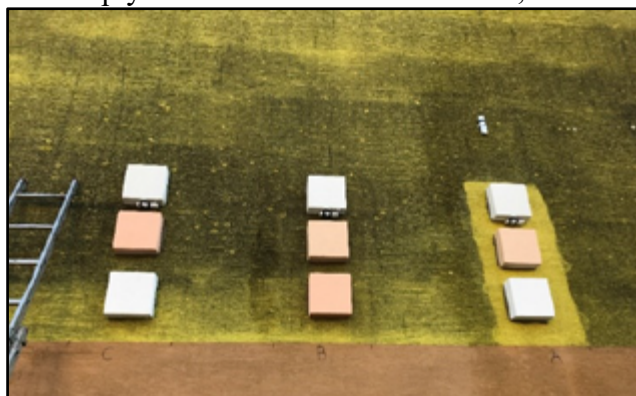
sú osadené na existujúcom zateplení s biologickým napadnutím, vid'. obr. 4. V rámci prípravy podkladu a aplikácie vzoriek konštrukcie „Double ETICS“ bol vykonaný prvý odber biologického materiálu z povrchu pôvodného zateplenia pre identifikáciu druhu a množstva mikroorganizmov. Pozorované a aplikované boli tri skupiny vzoriek s rôznou úpravou podkladu:

- podklad pre vzorku skupiny A s dekontamináciou a s očistením tlakovou vodou
- podklad pre vzorku skupiny B s dekontamináciou bez očistenia tlakovou vodou
- podklad pre vzorku skupiny C, ktorá bola ponechaná bez prípravy podkladu - bez dekontaminácie. Táto vzorka slúži zároveň na porovnanie rozvoja alebo úbytku mikroorganizmov v štrbine ako referenčná vzorka



Obr. 3: Príprava podkladu pred osadením izolačných dosiek [autor]

Druh a kvantitatívne zastúpenie biologického materiálu je potrebné určovať v osobitnom laboratóriu. Aby boli výsledky objektívne vo vzorkách čistených, a vypovedali aj o kvalite čistenia a prípravy podkladu, bol biologický materiál odoberaný v dvoch fázach, pred aplikáciou čistenia a následne pred aplikáciou novej konštrukcie zateplenia (čiže po príprave podkladu – čistení, čo preverilo kvalitu čistenia). Odoberaný bol aj vzduch v okolí objektu pre určenie pôvodu biologického materiálu. Následne bola po zbere informácií zastúpenia mikroorganizmov na pripravenom podklade aplikovaná na každú vzorku konštrukcia nového zateplenia v zmysle technologických pravidiel. Skupiny sú z dôvodu vylúčenia ovplyvňovania od seba vzdialené 1,2 m.



Obr. 4: Ukážka osadenia vzoriek na fasáde bytového domu [autor]

3. Výsledok mykologickej analýzy vzoriek

Odber vzoriek bol vykonaný pomocou vývrtov s priemerom 4 cm a hrúbky 6 cm. Biologický povlak zo zateplenej fasády viditeľne ukazuje silný porast hubami, riasami až machmi. Následne boli

odobraté aj vzorky vonkajšieho ovzdušia pomocou volumetrického aeroskopu A-AIR-010. Následne bola vykonaná laboratórna mykologickej analýza, ktorá určila druhy a množstvá mikroorganizmov.

Tab. č. 1: Mykologický výsledok z odberu vzoriek pred nalepením „Double ETICS“

| Výsledky kvalitatívnej a kvantitatívnej analýzy: | | | |
|--|--|--------------------------|---|
| Miesto odberu | | Množstvo | Druh |
| Vonkajšie ovzdušie | | 160 KTJ*/m ³ | Alternaria sp., Fusarium sp., Cladosporium cladosporioides, C.herbarum, Trichothecium roseum, Aspergillus ochraceus, kvasinky melanizované huby Dematiaceae |
| Povrchy omietok | Južná strana – bez viditeľného znečistenia | 107 KTJ/ cm ² | Cladosporium cladosporioides, Penicillium sp. Alternaria sp., Acremonium sp., Penicillium sp., Aureobasidium pullulans, Ulocladium chartarum, sterilné mycélium |
| | Severná strana – s viditeľným znečistením | 205 KTJ/cm ² | Penicillium sp., Alternaria sp., Cladosporium cladosporioides |
| | Západná strana - omietka bez polystyrénu | 541 KTJ/cm ² | Penicillium sp. |
| | Severná strana - sokel | 59 KTJ/cm ² | Cladosporium cladosporioides, Penicillium sp., Alternaria sp., Aureobasidium pullulans, melanizované huby Dematiaceae, sterilné mycélium |
| Polystyrény | Južná strana - čistejšia omietka | 210 KTJ/cm ³ | Penicillium sp., Mucor sp. |
| | Severná strana – znečistená | 1101 KTJ/cm ³ | Penicillium sp. |
| | Severná strana – sokel | 52 KTJ/cm ³ | Penicillium sp., Cladosporium, Absidia sp., cladosporioides, Acremonium sp. |

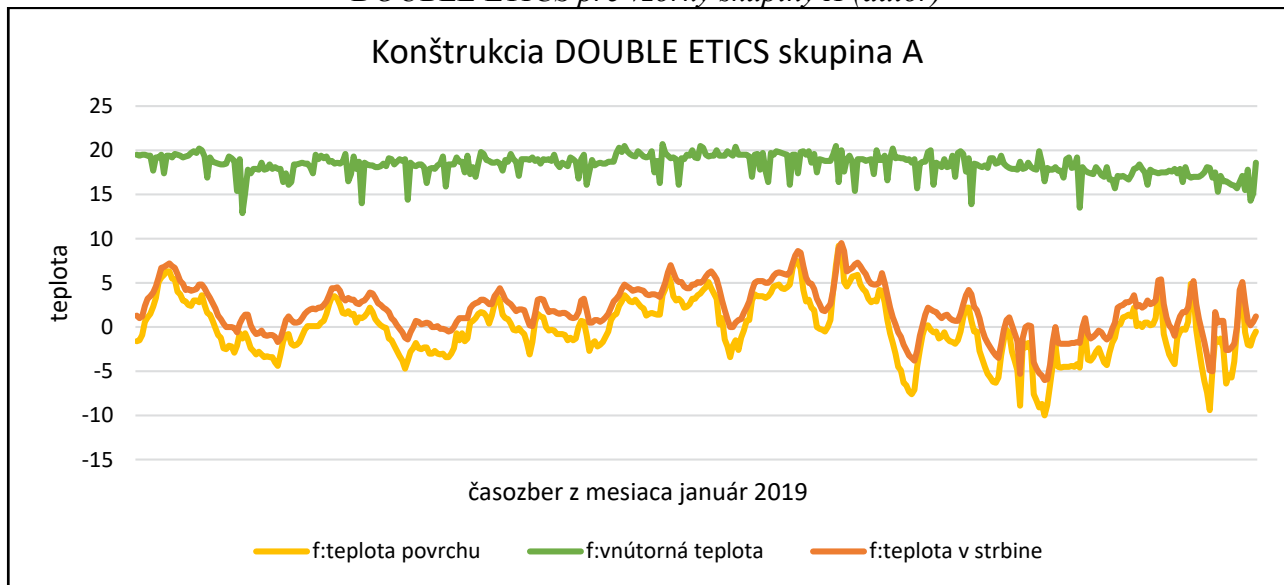
Z vyhodnotenie mykologickej analýzy, vykonanej pred osadením zdvojeného zateplenia vyplýva, že najviac frekventované na povrchu sú izolované mikroskopické vláknité huby, ktoré patria k bežnej mikroflóre vonkajšieho prostredia v chladnom vlhkejšom ročnom období. Mikroskopické vláknité huby však tvoria koreňový systém, vhodný pre rozvoj vyšších mikroorganizmov – machov a lišajníkov. Koreňový systém prerastá do podkladu. Niektoré zistené druhy mikroorganizmov dokážu vegetovať a j v štrbinách s minimálnou požiadavkou na svetlo.

4. Zaznamenávanie teplotných a vlhkosťných parametrov v súvrství „Double ETICS“

Na zaznamenávanie teplotných a vlhkosťných parametrov je použité inteligentné zariadenie pre bezdrôtové sledovanie klimatických podmienok. Prostredníctvom prístroja WeatherHub SmartHome System a ďalších záznamníkov TFA Temperatur Funksender + Kabelsensor, TFA – Thermo-Hygro Sensor je vykonaný zber vlhkosťných a teplotných údajov v rámci pozorovaného obdobia. Zaznamenávaná je teplota exteriéru, interiéru a pomocou sondy teplota v súvrství pôvodnej a novej konštrukcie zateplenia. Ďalším záznamníkom sú získavané hodnoty vnútornej a vonkajšej teploty a vlhkosti. Všetky exteriérové záznamníky sú osadené na priamo na fasáde bytového domu a záznamníky na interiérové podmienky sú umiestnené v jednej z bytových jednotiek.

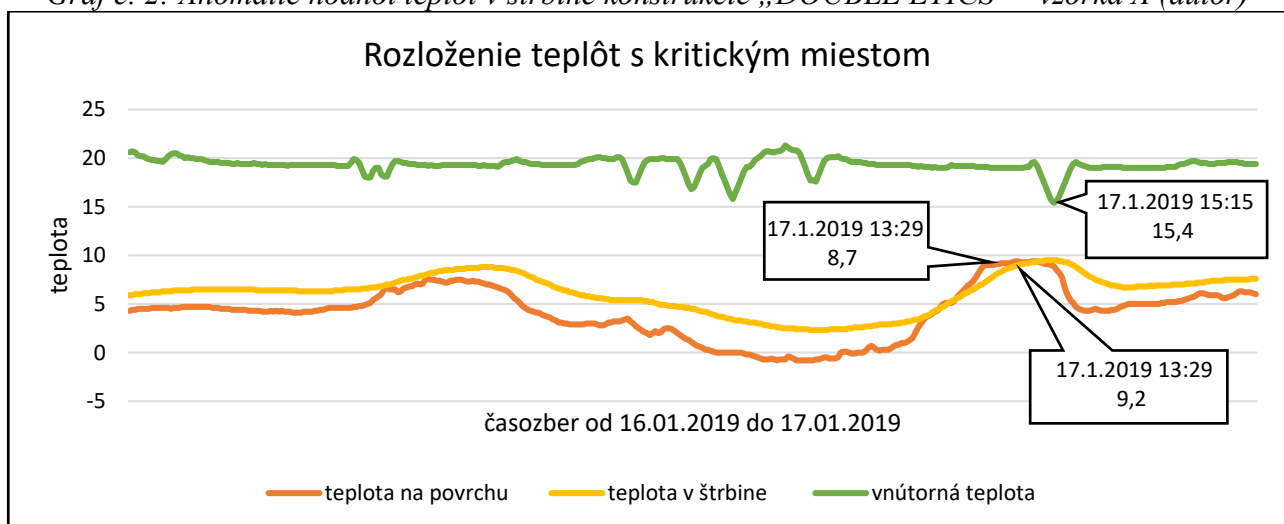
* KTJ - kolónie tvoriacich jednotiek húb

Graf č. 1: Záznam teploty prostredia, teploty vnútorného prostredia a teploty na sonde v štrbine DOUBLE ETICS pre vzorky skupiny A (autor)



Ďalšou úlohou je pomocou získaných hodnôt určiť, či sú v štrbine medzi pôvodným a novým zateplením vhodné vlhkostné a teplotné podmienky pre rozvoj mikroorganizmov, najmä v podobe možnosti vzniku kondenzácie vodných pár v styku dvoch konštrukcií v súbehu s vhodnými teplotnými podmienkami. Prvé výstupy zo zberu dát preukazujú fázové posuny medzi vnútorným a vonkajším prostredím, čo môže spôsobovať vlhkostné stavy v štrbine vhodné pre rozvoj mikroorganizmov. Z časozberu hodnôt sú zaznamenané anomálie v podobe poklesu teploty v štrbine a zároveň zvýšeniu povrchovej teploty. Práve v týchto dňoch je pri spádových podmienkach tlakov možné riziko vzniku kondenzácie.

Graf č. 2: Anomálie hodnôt teplôt v štrbine konštrukcie „DOUBLE ETICS“ - vzorka A (autor)



Záver

Po ukončení zberu dát (predpokladané obdobie min 1 rok) budú vzorky dobroté s fasády bytového domu. Vykoná sa opätovný odber biologického materiálu z priestoru štrbín a stanoví sa ich množstvo. Namerané tepelno-vlhkostné parametre budú vyhodnotené prepočtom teplotného a tlakového spádu

v skladbe „Double ETICS“ k styku pôvodnej a novej konštrukcie zateplenia a porovnané s teoretickým simulovaním teplotno-vlhkostných parametrov v konštrukcii zdvojeného zateplenia. Získané údaje o výskyte mikroorganizmov budú porovnávané s pôvodnými vzorkami odobratými pred aplikáciou vzoriek „Double ETICS“. Výsledky experimentu by mali preukázať vhodnosť teplotných a vlhkostných podmienok pre mikroorganizmy v súvrství novej a pôvodnej konštrukcie ETICS, ale aj určenie či došlo k úhynu alebo k zvýšeniu množstva mikroorganizmov vzhľadom na zabezpečenie kvality prípravy podkladu. Z vyhodnotenia očakávame rozdielne výsledky podľa rozdielnych skupín prípravy podkladu povrchu. Súčasťou vyhodnocovacieho procesu je analýza biologického nálezu na povrchu nových omietok aplikovaných vzoriek. Laboratórne určenie biologického materiálu si vyžaduje medziodborovú spoluprácu a spoluprácu s externým laboratórnym pracoviskom.

Výsledkom experimentu je možnosť preukázania teplotných a vlhkostných podmienok vhodných pre rozvoj mikroorganizmov v súvrství, výsledkom bude návrh na vyňatie možnosti aplikácie technológie „Double ETICS“ na biokoróziu napadnuté povrchy. V prípade, že sa experimentom nepreukáže zvýšená prítomnosť mikroorganizmov vo vzorke A, B alebo C, cieľom je návrh technologického predpisu pre vykonanie prípravy podkladu s mikroorganizmami pred aplikáciou technológie „Double ETICS“.

Literatúra

- [1] Breuer, K., Hofbauer, W., Krueger, N., Mayer, F., Scherer, C., Schwerd, R., Sedlbauer, K., Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit von Bioziden in Bautenbeschichtungen, Sonderdruck aus: Bauphysik 34 (2012), Heft 4, Seite 170-182, ISSN: 1437-0980
- [2] Valentina, F.; Diamantia, A.; Palleschi, G.: New bio-cleaning strategies on porous building materials affected by biodeterioration event. Applied Surface Science, 2010, č. 256, s. 6550-6563, ISSN 0169-4332
- [3] Daniotti, B.; Spagnolo, S. L.; Galliano, R.: The Durability Experimental Evaluation of Photocatalytic Cement-Based Materials, In: 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Portugal Porto, April 2011, č. 1, s. 212-219, ISBN 978-972-752-132-6
- [4] Gaylarde, C.; Ribas Silva, M.; Warscheid, Th.: Microbial impact on building materials: an overview. Materials and Structures, 2003, roč. 36, č. 5, s. 342-352, ISSN 1359-5997
- [5] Terpakova, E.; Estokova, A.: Analytical support in solving bio-corrosion of fasade systém ETICS. In: Section Green Buildings Technologies and Materials, 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016, June 28 - July 6, 2016, Book6 Vol. 2, 33-40 pp, ISBN 978-619-7105-69-8
- [6] Belániová, B.; Antošová, N.; Šuppejová, L.: Solution of problems of ETICS with biocorrosion. In Building Defects 2017, proceedings of the 9th International Scientific Conference. České Budějovice, Czech Republic, November 23-24, 2017, č. 146, s. 205-213. ISBN 978-2-7598-9032-3.
- [7] Tepelné posudky softvér Svoboda Teplo študentská verzia.
- [8] Barreira, E. - Peixoto de Freitas, V.: Importance of thermography in the study of ETICS finishing coatings degradation due to algae and mildew growth. 10 DBMC - International Conference On Durability of Building Materials and Components, LYON (France), April 2005, s. 17-20
- [9] Hartwig, M. K.; Krus, M.; Fitz, C.; Hofbauer, W.; Scherer Ch.; Breuer, K.: Accelerated Test Procedure to Assess the Microbial Growth Resistance of Exterior Finishes. In: 12th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Portugal Porto, April 2011, č. 1, s. 260-267, ISBN 978-972-752-132-6
- [10] Krus, M. - Rösler, D.: Hygrothermische Berechnung der Einsatzgrenzen unterschiedlicher Systeme bei der Aufdoppelung von Wärmedämmverbundsystemen. Bauphysik 33, Berlin, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2011, ISSN 1437-0980

Diana Bladová¹

Študijný program: Technológie stavieb, 2. ročník

ŠPECIFIKÁCIA A ANALÝZA 3D TLAČE

SPECIFICATION AND ANALYSIS OF 3D PRINTING ENGLISH TITLE

Abstract

This article focuses on the issue of concrete production and use. Despite its indisputable advantages, concrete also has its negatives. First, this article describes new technologies for building concrete structures. Their invention partially eliminates some of these negative impacts. Specifically, it is a description of D-shape and contouring technology. Specifies the contouring technology and 3D printer that is used in the process. Second, the advantages and disadvantages of 3D printing are analyzed. Finally, I evaluate the perspective of global use of 3D printing.

Kľúčové slová

3D tlač, nová technológia, betónová konštrukcia

1. Úvod

Betón je najpoužívanejším stavebným materiálom na svete. Jedným z hlavných dôvodov je cena surovín potrebných na jeho výrobu. Voda, cement a kamenivo (piesok) sú lacné a dostupné vo väčšine častí sveta. Zároveň sa doň pridávajú rôzne prísady a prímеси na zlepšenie vlastností jeho čerstvej aj zatvrdnutej formy. Medzi tieto vlastnosti patrí vyššia pevnosť, odolnosť voči požiaru, fluidita, samozhutniteľnosť, nízka stopa CO₂ atď.

2. Používanie betónu

V dnešnej dobe sa betónové konštrukcie zhotovujú pomocou debnenia alebo foriem. V oboch prípadoch ide o vyplnenie priestoru formy alebo debnenia, v ktorom už je predpripravená výstuž. Táto metóda sa používa ako na stavbe, tak aj mimo nej, napríklad vo výrobe prefabrikátov. Medzi výhody patrí fakt, že mimo stavby je možné dosiahnuť vyššiu kvalitu zmesi a následne aj zhotovených prvkov. Avšak v oboch prípadoch je veľká potreba pracovníkov či už na vyhotovenie zmesi alebo umiestnenie výstuže.

Aj keď používanie betónu ako stavebného materiálu sa môže zdať veľmi výhodné, v poslednej dobe sa dozvedáme o viacerých negatívach jeho produkcie. Pri výrobe cementu sa pri výpale spotrebúva veľmi veľa energie. Odhaduje sa, že výroba cementu činí 5% celosvetovej produkcie CO₂ (World Business Council on Sustainable Development [WBCSD], 2002). Začatie používania náhrad cementu (napr. lietajúci popolček) znížilo produkciu CO₂. Väčšie zníženie produkcie CO₂ je momentálne takmer nemožné, a to hlavne kvôli nízkej cene surovín.

Ďalším negatívom je potreba pracovníkov. Pracovníci sú potrební či už pri ukladaní výstuže do foriem/debnenia alebo pri samotnom ukladaní betónu. Ministerstvo v USA zistilo, že pracovníci

podieľajúci sa na výrobe betónu majú veľmi vysokú šancu mať zdravotné problémy spojené s podráždením očí, kože a dýchacej sústavy. V neposlednom rade je potrebné spomenúť, že pri betónovaní sa mnoho krát stáva, že sa použije viac materiálu, ako je potrebné. To je hlavne z dôvodu, že sa uprednostňuje jednoduchosť geometrie na úkor optimálnej spotreby materiálu.

3. Nové metódy

3.1 Kontúrovacia metóda

Približne od roku 1995 sa začali vyvíjať nové metódy na vytváranie betónových konštrukcií. Vývoj sa začal v Kalifornii, kde Khoshnevis vynašiel tzv. technológiu kontúrovania. Táto technológia pozostáva z postupného ukladania vrstiev cementovej malty. Takmer všetky nasledujúce výskumy používajú práve tento princíp ukladania. Od roku 2012 sa počet nových projektov vytvorených tzv. kontúrovaním exponenciálne zvyšuje [1]. Na nasledovných obrázkoch je pár najznámejších príkladov.



Obr. 1: Konštrukcie vytvorené technológiou kontúrovania [1]

3.2 Metóda D-shape

Iným spôsobom je tzv. D-shape. Tento spôsob vynašiel Enrico Dini. Princípom je striedanie vrstiev zrnitého materiálu (0,1 – 0,4 mm) a „atramentového spojiva“, ktorého konzistencia sa podobá vode. Pri kontakte zrnitého materiálu a spojiva sa vytvorí tuhá hmota [2]. Týmto spôsobom sa zatiaľ tvoria hlavne sochy a podobné konštrukcie, ktoré plnia hlavne dekoračnú funkciu. Vo výrobní už ale prebehlo aj pár pokusov o vytvorenie domu resp. budovy.



Obr. 2: Konštrukcie vytvorené metódou D-shape [2],

4. 3D tlačiareň

Keďže predmetom mojej dizertačnej práce je práve tzv. kontúrovacia technológia, v tomto článku uvediem príklad 3D tlačiarne s opisom jej častí a fungovania. Opisovaná 3D tlačiareň sa nachádza na Technickej univerzite v Eindhovene v Holandsku. Fungovať začala v roku 2015.

4.1 Parametre a konštrukcia

Táto 3D tlačiareň poskytuje celkovú oblasť tlače o rozmere 9 x 4,5 x 2,8 m. Disponuje rýchlosťou tlače 100 mm/s. Pri zmene smeru (napr. pri tlačení rohov budov), je tlač samozrejme pomalšia. Celková potreba spomalenia závisí od uhla zmeny smeru. Zmes cementovej malty je tlačaná cez hadicu čerpadlom s tlakom 1 – 3 MPa. Zvolený tlak čerpadla a rýchlosť tlače je ovplyvnený aj konzistenciou tlačenej zmesi a typom použitej trysky. Základnými komponentami 3D tlačiarne sú: samotná kovová konštrukcia, čerpadlo na čerpanie maltovej zmesi, hadica napojená na toto čerpadlo a vertikálne rameno, na ktorého konci je nainštalovaná tlačová hlava s tryskou. Konštrukciu 3D tlačiarne možno vidieť na obr. 3.



Obr. 3: 3D tlačiareň – TU Eindhoven (Holandsko) [3],

4.2 Princíp tlače

Zmes cementovej malty je hnaná čerpadlom, ktoré je umiestnené pri konštrukcii 3D tlačiarne. Táto zmes je prostredníctvom hadice dopravená ku tlačovej hlave. Tlačová hlava pozostáva z viacerých častí. Jej najdôležitejšou časťou z pohľadu samotnej tlače je tryska, ktorá je koncovou časťou 3D tlačiarne (obr. 4). Môže mať rôzny tvar. Najskôr sa používala tryska s kruhovým prierezom o priemere 25 mm. Tento typ sa ale neosvedčil, nakoľko ukladanie vrstiev bolo zložité. Neskôr sa použila tryska so štvorcovým prierezom so stranou dlhou 25 mm. Pri použití tejto trysky dochádza k jednému problému. Pri zmene smeru tlače (napr. o 45 stupňov na rohu budovy) dochádza ku tzv. skrúteniu tlačenej zmesi (obr. 5) [1]. Na základe skúseností sa dnes používa tryska s obdĺžnikovým prierezom o rozmere 40 x 10 mm, ktorá sa osvedčila ako najvýhodnejšia.



Obr. 4: Tryska [4]



Obr. 5: Krútenie tlačenej zmesi na rohoch tlačenej konštrukcie [1]

4.3 Materiál na tlač

Všeobecne sa na 3D tlač používa zmes cementu, vody, piesku a rôznych prísad a prímiesí na zlepšenie jej vlastností. Konkrétne v tomto prípade sa používa portlandský cement s označením CEM I 52,5 R, kremičitý piesok s maximálnou veľkosťou častíc 1 mm, špecifické prísady a prímеси na zlepšenie spracovateľnosti a na získanie tixotropných vlastností a malé množstvo polypropylénových vlákien na redukciu zmršťovania a výskytu trhlin na začiatku tvrdnutia. Čo sa týka parametrov tejto používanej zmesi, dosahuje 28 dňovú pevnosť v tlaku cca. 30 N/mm² a pevnosť v ťahu pri ohybe cca. 5 N/mm². Momentálne sa zloženie tejto zmesi neustále modifikuje, nakoľko sa stále nedosiahli jej optimálne vlastnosti. Ide napríklad o dostatočné prepojenie jednotlivých vrstiev a maximálny počet vrstiev uložených na seba.

5. Výhody a nevýhody 3D tlače

5.1 Výhody

Medzi výhody použitia 3D tlače patrí hlavne zníženie nákladov na výstavbu. Hlavným dôvodom nižších nákladov je, že pri výstavbe nie je potrebné debnenie. Táto výhoda môže veľmi ovplyvniť rozvoj 3D tlače hlavne v menej vyspelých krajinách, kde je cena hlavným ukazovateľom pri výbere. Keďže nie je potrebné debnenie, nie sme limitovaný ani pri tvare konštrukcie a môžu sa zhotoviť rôzne zakrivené konštrukcie. Ďalšou výhodou je rýchlosť, nakoľko boli už vytlačené prvé domy aj

pod 24 hodín. Bezpečnosť je obrovskou prioritou pri každej činnosti. Vďaka takmer plno automatizovanému procesu 3D tlače sa bezpečnosť pri práci výrazne zvyšuje v porovnaní s bezpečnosťou pri klasickom postupe výstavby. Keďže ide o automatizovaný proces, pri výstavbe dochádza aj ku menšiemu výskytu chýb, čo v konečnom dôsledku znamená šetrenie času aj finančných prostriedkov.

5.2 Nevýhody

Aj keď sa znížia náklady na výstavbu, počiatočné náklady na zaobstaranie 3D tlačiarne sú momentálne veľmi vysoké. Postupom času však ceny tlačiarní budú klesať, nakoľko sa predpokladá, že v tomto odvetví bude narastať konkurencia. Za ďalšiu nevýhodu považujem obmedzenie pri výbere materiálu. Materiál musí spĺňať rozličné požiadavky a do rozvojových krajín bude pravdepodobne nutné ho dovážať. Poslednou spomenutou nevýhodou je zníženie potreby pracovnej sily. Keďže je 3D tlač automatizovaný proces, potreba pracovníkov je výrazne nižšia ako pri klasickej výstavbe. Tento problém sa ale netýka iba tejto oblasti, v dôsledku automatizácie a robotizácie sa znižuje počet pracovníkov vo všetkých priemyselných odvetviach [5].

6. Záver

Potenciál využitia 3D tlače je veľmi veľký. V súčasnosti prebiehajú prvé návrhy aj na budovanie telies a iných prvkov vo vesmíre. Aj napriek spomínaným výhodám sa však nepredpokladá, že by došlo ku globálnemu nahradeniu klasických postupov výstavby v blízkej budúcnosti. Širšie uplatnenie by mohla 3D tlač nájsť v rozvojových alebo preľudnených krajinách, nakoľko ide o rýchlu a relatívne lacnú technológiu.

Literatúra

- [1] BOS, F. – WOLFS, R. – AHMED, Z. – SALET, T.: Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. In: *Virtual and Physical Prototyping*. Eindhoven: Technical university, 2016. s. 209-225. ISSN 1745-2759.
- [2] www.d-shape.com
- [3] O'NEIL, B.: Netherlands: Eindhoven University of Technology Embarks on Extended Project in Concrete 3D Printing. 2015. URL: <https://3dprint.com/102534/tu-e-concrete-3d-printing/>
- [4] BOWLER, T.: The battle to curb our appetite for concrete. 2018. URL: <https://www.bbc.com/news/business-45893549>
- [5] <http://architectoutsourcing.com/blogs/pros-and-cons-of-3d-printed-construction/>

Katarína E. Hellová¹

Študijný program: Technológia stavieb, 3. ročník

Porovnanie skladieb murovaných obvodových konštrukcií s dodatočným zateplením ETICS

The Comparison of the Composition of Brick Exterior Structures with Additional Thermal Insulation ETICS

Abstract

Buildings account for 40% of total energy consumption, and we can save 78% by building passive and ultra-low-energy buildings. In order to achieve zero building parameters, high-quality peripheral structures are essential, the use of solar and indoor thermal gains and the coverage of a large part of the need for renewable energy are essential. The article compared the selected structures of the support exterior walls with regard to the criterion of the required thermo-technical characteristics of the building structure - coefficient of thermal transfer of the structure U for the ultra-low-energy building according to STN 73 0540 . In conclusion, it is proved that the most advantageous composition of the perimeter wall is a brick construction with additional insulation ETICS, means External Thermal Insulation Composite System. The composition is satisfactory both in terms of price and its thermo-technical properties.

1. Úvod

Z celkovej spotreby energie pripadá až 40 % na budovy a z tejto energie vieme ušetriť 78 % výstavbou pasívnych a ultranízkoenergetických budov [1]. Aby budova bola schopná dosiahnuť úsporu energie, potrebuje mať realizovaný dokonalý tepelnoizolačný obal. Jednou z najdôležitejších úloh je výber stavebných materiálov, ktoré budú tvoriť rozhranie medzi vnútorným a vonkajším prostredím. Stavebný trh ponúka zákazníčkovi veľké množstvo produktov a riešení. Túto situáciu možno vnímať pozitívne, pretože vytvára veľké konkurenčné prostredie, kedy sa výrobcovia predbiehajú vo vyvíjaní nových alebo inovovaní existujúcich produktov. Pre bežného zákazníka môže mať táto situácia aj negatívny dopad, kedy sa v snahe nájsť najlepšie riešenie doslova stratí v záplave na mieru zostavených ponúk a nových technológií [2]. Okrem správneho výberu materiálov je dôležitá aj spotreba energie na vykurovanie, ktorá v podstatnej miere ovplyvňuje tepelno-technické parametre stavebných konštrukcií. Na dosiahnutie parametrov takmer nulovej budovy sú nevyhnutné kvalitné obvodové konštrukcie, zásadné je aj využitie solárnych a vnútorných tepelných ziskov a pokrytie veľkej časti potreby energie z obnoviteľných zdrojov [4].

2. Metodika

V článku je riešená murovaná konštrukcia s dodatočným zateplením ETICS. ETICS je skratka pre kontaktný zatepl'ovací systém (z anglického External Thermal Insulation Composite System). Skladá sa z niekoľkých vrstiev, ktoré sa aplikujú na obvodové steny kontaktne, teda bez vzduchových medzier – priamo jedna na druhú v určenom poradí. Dôležité je pritom dodržať skladbu materiálov a prvkov stanovenú konkrétnym výrobcom. Hlavnou zložkou ETICS je tepelnoizolačný materiál, ktorý sa kontaktne prilepí k obvodovej stene. Jeho povrch chráni výstužné (armovacie) súvrstvie a finálna povrchová úprava. K doplnkom patria napríklad rohové alebo dilatačné lišty a tiež soklový profil, ktorý vytvorí rovný spodný okraj a chráni tepelnoizolačný materiál pred poškodením.

¹Katarína E. Hellová, Ing., Katedra materiálového inžinierstva, Slovenská technická univerzita v Bratislave¹

Murovacie materiály sú rozdelené do dvoch skupín podľa materiálovej bázy na tehlu a pórobetón. Hrúbka murovacieho materiálu je jednotná 300 mm a na murovanie sa používa tenkovrstvová malta alebo špeciálna murovací pena. Ako referenčná murovaná konštrukcia bude stena s rozmermi 3 x 1m. V nasledujúcich tabuľkách sa nachádza porovnanie rozhodujúcich parametrov a ich cien. Zelenou farbou je označený materiál s najlepšou cenou, ktorý sa následne použil v záverečnom porovnaní.

Spomedzi murovacích prvkov rôznych výrobcov, ktorých parametre sú spracované do tabuliek boli vybrané výrobky, ktoré v rámci produktového radu spĺňajú minimálne cieľovú odporúčanú hodnotu R_{R1} a sú cenovo najvýhodnejšie.

Spomínaná hodnota R vyjadruje tepelný odpor a teda akou plochou konštrukcie a pri akom rozdiely teplôt na ich povrchoch dôjde k prenosu 1 wattu, respektíve k prenosu energie vo veľkosti 1 J za 1 sekundu [5]. Ďalšou hodnotou, ktorá je udávaná v tabuľkách je λ . Táto veličina vyjadruje schopnosť konštrukcie viesť teplo. Vyjadruje sa vo wattoch na meter krát kelvin [W/m.K] [5]. Potrebnú hodnotu nájdeme v teplototechnickej norme STN 73 0540 alebo priamo u výrobcu. Súčiniteľ tepelnej vodivosti λ je celkovo veľmi dôležité kritérium na porovnávanie kvality tepelných izolácií. Čím je hodnota nižšia tým je kvalita tepelnej izolácie vyššia a teplo uniká cez taký materiál pomalšie.

3. Murovaná konštrukcia s dodatočným zateplením ETICS

3.1 Tehla

| Produktový názov | Materiálová báza | d [mm] | Tepelný odpor vrstvy R_d [m ² . K/W] | Súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda_{10,DRY}$ [W/ m.K] | Cena bez DPH [€/m ²] | Cena bez DPH za 3 m ² [€/m ²] |
|------------------------------------|------------------|--------|---|--|----------------------------------|--|
| HELUZ UNI 30 brúsená | keramika | 300 | 1,80 | 0,159 | 31,47 | 94,41 |
| HELUZ P15 30 brúsená | keramika | 300 | 1,71 | 0,165 | 37,76 | 113,28 |
| HELUZ Family 30 brúsená | keramika | 300 | 3,78 | 0,088 | 43,04 | 129,12 |
| POROTHERM 30 Profi P15 | keramika | 300 | 1,97 | 0,150 | 32,48 | 97,44 |
| TermoBRIK TD 300 PD P15 DRY | keramika | 300 | 2,28 | 0,132 | 18,04 | 54,12 |
| LeierPLAN 30 N+F | keramika | 300 | 1,87 | 0,132 | 24,80 | 74,4 |

Tab. 1 Porovnanie rozhodujúcich parametrov murovacích materiálov pre obvodové keramické konštrukcie s dodatočným zateplením

3.2 Porobetón

| Produktový názov | Materiálová báza | d [mm] | Tepelný odpor vrstvy R_d [m ² . K/W] | Súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda_{10,DRY}$ [W/ m.K] | Cena bez DPH [€/m ²] | Cena bez DPH za 3 m ² [€/m ²] |
|--------------------------|------------------------------|--------|---|--|----------------------------------|--|
| YTONG Statik Plus | autoklávovaný pórobetón | 300 | 1,76 | 0,100 | 41,75 | 125,25 |
| YTONG Statik | autoklávovaný pórobetón | 300 | 2,14 | 0,150 | 39,72 | 119,16 |
| YTOONG Univerzal | autoklávovaný pórobetón | 300 | 2,73 | 0,150 | 35,84 | 107,52 |
| YTONG Standard | autoklávovaný pórobetón | 300 | 3,00 | 0,150 | 34,78 | 104,34 |
| PORFIX P2-400 | pórobetón – kremičitý piesok | 300 | 3,98 | 0,089 | 31,84 | 95,52 |
| PORFIX P2-600 | pórobetón – kremičitý piesok | 300 | 2,00 | 0,150 | 32,40 | 97,20 |

Tab. 2 Porovnanie rozhodujúcich parametrov murovacích materiálov pre obvodové pórobetónové konštrukcie s dodatočným zateplením

3.3 Kontaktné zateplenie polystyrénom

| Produktový názov | d [mm] | Tepelný odpor vrstvy R_d [m ² . K/W] | Súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda_{10,DRY}$ [W/ m.K] | Cena bez DPH [€/m ²] | Cena bez DPH za 3 m ² [€/m ²] |
|---------------------------------|--------|---|--|----------------------------------|--|
| ISOVER EPS 70 F | 100 | 2,65 | 0,038 | 6,00 | 18,00 |
| POLYFORM EPS 70 F | 100 | 2,60 | 0,038 | 4,20 | 12,60 |
| SLOVIZOL EPS 70 F | 100 | 2,55 | 0,039 | 4,00 | 12,60 |
| STYROTRADE EPS 70 F | 100 | 2,60 | 0,039 | 4,43 | 13,29 |
| PENOPOL PARABIT EPS 70 F | 100 | 2,56 | 0,039 | 5,06 | 15,18 |

Tab. 3 Porovnanie rozhodujúcich parametrov pri použití nosnej murovanej konštrukcie a zateplenia ETICS rôznymi druhmi expandovaného polystyrénu EPS

| Produktový názov | d [mm] | Tepelný odpor vrstvy R_d [m ² . K/W] | Súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda_{10,DRY}$ [W/ m.K] | Cena bez DPH [€/m ²] | Cena bez DPH za 3 m ² [€/m ²] |
|---------------------------------|-----------|--|---|----------------------------------|---|
| ISOVER EPS GREYWALL | 80 | 2,56 | 0,031 | 8,00 | 24,00 |
| POLYFORM EPS 70 NEO | 80 | 2,55 | 0,031 | 4,30 | 12,90 |
| SLOVIZOL EPS 80 GRAPHITE | 80 | 2,55 | 0,031 | 4,30 | 12,90 |
| STYROTHERM PLUS | 80 | 2,50 | 0,032 | 4,41 | 13,23 |
| PENOPOL EPS 70 GREY | 80 | 2,50 | 0,032 | 5,03 | 15,09 |

Tab. 4 Porovnanie rozhodujúcich parametrov pri použití nosnej murovanej konštrukcie a zateplenia ETICS rôznymi druhmi expandovaného grafitového polystyrénu EPS

3.4 Kontaktné zateplenie minerálnou vlnou

| Produktový názov | Materiálová báza | d [mm] | Tepelný odpor vrstvy R_d [m ² . K/W] | Súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda_{10,DRY}$ [W/ m.K] | Cena bez DPH [€/m ²] | Cena bez DPH za 3 m ² [€/m ²] |
|----------------------------------|------------------------------------|-----------|--|---|----------------------------------|---|
| ISOVER TF PROFI | kamenná vlna-čadičová | 100 | 2,75 | 0,036 | 17,35 | 52,05 |
| ISOVER NF 333 | kamenná vlna-čadičová | 100 | 2,40 | 0,041 | 15,55 | 46,65 |
| ISOVER TWINNER | ISOVER GREYWALL + ISOVER TF PROFI | min 120 | 3,50 | 0,034 | 24,25 | 72,75 |
| ROCKWOOL FRONTROC K MAX E | dvojvrstvová doska z kamennej vlny | 100 | 2,75 | 0,036 | 18,00 | 54,00 |

Tab. 5 Porovnanie rozhodujúcich parametrov pri použití nosnej murovanej konštrukcie a zateplenia ETICS kamennou vlnou

| Produktový názov | Materiálová báza | d [mm] | Tepelný odpor vrstvy R_d [m ² . K/W] | Súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda_{10,DRY}$ [W/ m.K] | Cena bez DPH [€/m ²] | Cena bez DPH za 3 m ² [€/m ²] |
|--|-------------------------|--------|---|--|----------------------------------|--|
| ISOVER CLIMA 034 | sklená vlna | 80 | 2,35 | 0,034 | 14,75 | 44,25 |
| KNAUF INSULATION FKD S Thermal | sklená vlna | 100 | 2,85 | 0,035 | 17,94 | 53,82 |
| KNAUF INSULATION SMARTwall S C1 | sklená vlna s nástrekom | 80 | 2,35 | 0,035 | 18,06 | 54,18 |

Tab. 6 Porovnanie rozhodujúcich parametrov pri použití nosnej murovanej konštrukcie a zateplenia ETICS sklenou vlnou

3.5 Nové materiály pre kontaktné zateplenie

| Produktový názov | Materiálová báza | D [mm] | Tepelný odpor vrstvy R_d [m ² . K/W] | Súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda_{10,DRY}$ [W/ m.K] | Cena bez DPH [€/m ²] | Cena bez DPH za 3 m ² [€/m ²] |
|------------------------------|------------------------|--------|---|--|----------------------------------|--|
| ISOVER PURENOTHEM | PIR-polyuretánová pena | 70 | 2,55 | 0,25 | 44,25 | 132,75 |
| KINGSPAN KOOLTHERM K5 | tvrdená fenolová pena | 50 | 2,50 | 0,20 | 30,43 | 91,29 |

Tab. 7 Porovnanie rozhodujúcich parametrov pri použití nosnej murovanej konštrukcie a zateplenia ETICS PIR - izoláciou, fenolovou penou

4 Výsledné konštrukcie a ich posúdenie

V tabuľke 8 som zosumarizovala cenovo najvýhodnejšie skladby pre všetky dva druhy konštrukcií a ich materiálové variácie. Skratka T znamená *T = TermoBRIK TD 300 PD P15 DRYsystem* použitá skratka P zase *P = PORFIX P2-400*.

| Materiál | Hrúbka [mm] | Murivo [€/3.m ²] | Omietky, nástrek, lepidlo [€/3.m ²] | Izolácia [€/3.m ²] | ETICS [€/3.m ²] | Výsledná cena [€/3.m ²] |
|------------------------|-------------|------------------------------|---|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| EPS 70 F SLOVIZOL | 100 | T 54,12 | 4,05 | 12,00 | 39,43 | 109,6 |
| | | P 95,52 | | | | 151 |
| grafitový EPS SLOVIZOL | 80 | T 54,12 | 4,05 | 12,90 | 38,23 | 109,3 |
| | | P 95,52 | | | | 150,70 |
| sklená vlna ISOVER | 80 | T 54,12 | 4,05 | 44,25 | 41,74 | 144,16 |
| | | P 95,52 | | | | 185,56 |
| kamenná vlna ISOVER | 100 | T 54,12 | 4,05 | 46,65 | 42,94 | 147,76 |
| | | P 95,52 | | | | 189,16 |

Tab. 8 Výsledné cenové porovnanie konštrukcií

Najlacnejším typom konštrukcie je tehlová murovaná konštrukcia hrúbky 300 mm s dodatočným zateplením ETCIS. Cenové rozpätie je pre referenčnú tehlovú konštrukciu od 109,3 €/3m² do 147,76 €/3m² pre pórobetónovú konštrukciu od 151,00 €/3m² do 189,16 €/3m². Cenové poradie izolačných materiálov je grafitový polystyrén EPS SLOVIZOL hr. 80mm, expandovaný polystyrén SLOVIZOL hr. 100 mm, sklená vlna ISOVER hr. 80 mm a kamenná vlna ISOVER hr. 100 mm. Medzi bielym a grafitovým polystyrénom EPS je rozdiel v cene len desiatky centov, čo pri dynamicky sa meniacich cenách v stavebníctve je prakticky zanedbateľný rozdiel. Cena bieleho polystyrénu pri hrúbke 100 mm sa pohybuje v rozmedzí od 4,00€ /m² do 6,00 € /m², cena grafitového polystyrénu hrúbky 80 mm v rozmedzí od 4,30€/m² do 8,00 € /m². Grafitový polystyrén má o približne 20% lepšie tepelnoizolačné schopnosti ako biely polystyrén, čo umožňuje použitie menšej hrúbky. Pri porovnaní grafitového a bieleho polystyrénu rovnakej hrúbky je cena grafitového polystyrénu vyššia. Avšak ak aplikujeme myšlienku, že grafitový polystyrén má lepšie izolačné schopnosti v konečnom meradle je cena menšej hrúbky grafitového polystyrénu porovnateľná s cenou bieleho pri väčšej hrúbke. Tento fakt zohrá úlohu aj pri sprísnení požiadaviek od roku 2020. Aktuálne pri murovanej konštrukcii s dodatočným zateplením je rozdiel v hrúbke len 2 cm.

Najdrahšou položkou je murovací materiál a najlacnejšou izolácia. Tento fakt užívatelia bez stavebného vzdelania ale často prehliadajú a šetriť sa snažia nelogicky na izolačnom materiály, znižovaním hrúbky na hraničné hodnoty alebo nákupom lacného materiálu za hranicami od neoverených výrobcov. Pre spotrebiteľa je dôležité si uvedomiť skutočnosť, že zateplenie netvorí len vybraný izolant, ale všetky jeho komponenty, ktoré k nemu bezvýhradne patria. Pre plnohodnotné plnenie svojej funkcie je potrebné zároveň zabezpečiť, aby jednotlivé vybrané komponenty

spolupôsobili. V tomto hľadisku napomáhajú výrobcovia, pretože zväčša ponúkajú vo svojom sortimente ucelené systémy ETICS, pri ktorých garantujú dané parametre a kvalitu.

Dražšou alternatívou ETICS je použitie minerálnej vlny. Cena za referenčnú plochu 3 m² je v rozmedzí od 44,25 € do 54,18 € pre sklenú a od 46,65 € do 72,75€ pre kamennú vlnu. Cena izolantu je v tomto prípade porovnateľná s cenou za ostatné komponenty ETICS a snaha ušetriť má teda opodstatnenie a pri návrhu je vhodné výpočtom preukázať potrebnú hrúbku vybraného izolantu pre dosiahnutie tepelno-technických požiadaviek. Použitie minerálnej vlny pre zateplenie je z požiarneho hľadiska povinné pre budovy, od hranice presahujúcej 22,5 metra výšky budovy.

Využitie ostatných prírodných materiálov pre vyhotovenie ETICS na murovanej konštrukcii je z finančného hľadiska neefektívne. Neefektívne je aj použitie penovej izolácie, ktorá by mala veľmi malú hrúbku a jej cena je aktuálne vysoká. Zvýšený nárast využitia penovej izolácie sa dá očakávať po poslednej vlne sprísňovania požiadaviek na výstavbu.

V prospech murovanej alternatívy s dodatočným zateplením ETICS hovorí aj skutočnosť, že celoobvodové opláštenie pomáha eliminovať tepelné mosty vyplývajúce z nedostatočnej kvality odvedenej práce alebo nedokonale vyriešených konštrukčných detailov.

Literatúra

- [1] Sternová, Z. : Tepelnotechnické vlastnosti stavebných koštrukcií a budov, prednáška – energetická hospodárnosť budov v centre pozornosti, 2012, TSÚS
- [2] Rouseková, I. a kol.: Stavebné materiály. Bratislava, JAGA GROUP 2009, ISBN 80-88905-21-4
- [3] Chybík, J. : Přírodní stavební materiály. Praha, Grada Publishing 2009, ISBN 978-80-247-2532-1
- [4] Mendľan, R. : Nové teplototechnické požiadavky na výstavbu budov platné od 1.1.2016, Eurostav 1_2/2016 , [online, prístupné dňa 18.4.2018] dostupné na: <https://www.setri.sk/nove-teplototechnicke-poziadavky-na-vystavbu-budov-platne-od-1-1-2016/>
- [5] STN 73 0540-1:2012, Tepelná ochrana budov – Tepelnotechnické vlastnosti stavebných koštrukcií a budov Časť 1: Terminológia
- [6] STN 73 0540-2/Z1:2016, Tepelná ochrana budov – Tepelnotechnické vlastnosti stavebných koštrukcií a budov Časť 2: Funkčné požiadavky
- [7] STN 73 0540-3:2012, Tepelná ochrana budov – Tepelnotechnické vlastnosti stavebných koštrukcií a budov Časť 3: Vlastnosti prostredia a stavebných výrobkov
- [8] www.asb.com , JAGA GROUP , [online, prístupné dňa 18.4.2018] dostupné na: <https://www.asb.sk/stavebnictvo/stavebne-materialy/tepelne-izolacie/mineralna-vlna-a-jej-pouzitie>
- [9] www.baumit.sk , BAUMIT, [online, prístupné dňa 28 .4.2018] dostupné na: http://www.baumit.sk/upload/download/Baumit_Cennk_2018.pdf
- [10] www.isover.com , ISOVER SAINT-GOBAIN, [online, prístupné dňa 18.4.2018] dostupné na: <https://www.isover.sk/sklena-vlna>
- [11] www.knaufinsulation.sk , Knauf Insulation [online, prístupné dňa 18.4.2018] dostupné na: <http://www.knaufinsulation.sk/sklena-alebo-kamenna-vlna>
- [12] www.isover.sk , ISOVER SAINT-GOBAIN , [online, prístupné dňa 18.4.2018] dostupné na: <https://www.isover.sk/polystyren-ep>
- [13] www.heluz.sk , HELUZ, [online, prístupné dňa 28 .4.2018] dostupné na: <http://www.heluz.sk/sk/vyrobky/tehly-pre-obvodove-a-vnutorne-murivo>

Radovan Majer¹

Študijný program: D-TS4 technológia stavieb, 2. ročník

METÓDY KALKULOVANIA UŠLÉHO ZISKU V STAVEBNEJ ZÁKAZKE

METHODS OF CALCULATING LOST PROFITS IN CONSTRUCTION ORDER

Abstract

The starting point of the researched issue will be an analysis of current shortcomings in the process of building preparation from the perspective of the builder and contractor. Given the scope of the issue under consideration, this article deals only with the contractor's stage of preparation of the construction on the basis of the brief characteristics of ŽCS. Subsequently, after processing the analysis, there is a proposal of solutions to deficiencies and problems, which are usually caused by insufficient preparation of buildings by the contractor. The analysis of defects and deficiencies in the preparation of structures is also supported by a survey among entities acting as contractors. The second part of the article deals with one of the problems, which usually arises from poor quality preparation, namely "lost profit", its specification and presentation of calculation methods abroad and partly in our construction practice. The whole investigation process is presented by a model case from real construction practice.

Kľúčové slová

zhotoviteľ stavby, životný cyklus stavby, príprava stavby, ušlý zisk

1 Úvod

Východiskom skúmanej problematiky bude analýza súčasných nedostatkov v procese prípravy stavieb z pohľadu stavebníka a zhotoviteľa. Tento článok sa vzhľadom na rozsah skúmanej problematiky venuje na základe stručnej charakteristiky životného cyklu stavby len fáze prípravy stavby zo strany zhotoviteľa. Následne, po spracovaní analýzy, nasleduje návrh riešení nedostatkov a problémov, ktoré sú spravidla vyvolané práve nedostatočnou prípravou stavieb zhotoviteľom. Analýza chýb a nedostatkov v príprave stavieb je podporená aj prieskumom medzi subjektami pôsobiacimi vo funkcii zhotoviteľov. Druhá časť článku sa zaoberá jedným z problémov, ktorý spravidla vyplýva z nekvalitnej prípravy a to „ušlý ziskom“, jeho špecifikovaním a prezentáciou metód výpočtu v zahraničnej a sčasti už aj v našej stavebnej praxi. Celý proces skúmania je prezentovaný modelovým prípadom z reálnej stavebnej praxe.

2 Životný cyklus stavby

Stavebné dielo, ako výsledok stavebnej a montážnej činnosti, vrátane zabudovaných materiálov a strojov, má svoj životný cyklus, s podrobnejším členením na jednotlivé fázy:

- Fázu obstarávania
- Fázu používania
- Fázu likvidácie alebo zmeny užívania stavebného diela.

Investičný proces predstavuje fázu obstarávania životného cyklu stavebného diela, ktorá sa z hľadiska tohto investičného procesu člení na nasledujúce etapy:

- Predprojektová príprava
- Projektová príprava

¹ Radovan Majer, Ing. , SvF STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05, Bratislava

- Realizácie stavby.

Náklady, vznikajúce investorovi stavby vo fáze obstarávania súvisia so zabezpečením činností vykonávaných v rámci predprojektovej, projektovej prípravy a realizácie stavby. [1]

3 Prieskum problémov vznikajúcich z nedostatočnej prípravy stavieb

Pre účely získania obrazu o problémoch vznikajúcich z nedostatočnej prípravy stavieb sme vytvorili dotazník, ktorý obsahuje 5 otázok súvisiacich s prípravou stavieb z pohľadu zhotoviteľa stavby. Na tomto prieskume sa do uzávierky publikovania tohto článku zúčastnilo dvadsať zhotoviteľských firiem. Tieto otázky sú uvedené nižšie:

1. Disponujete dostatočným množstvom podkladov s dostatočnou podrobnosťou (získaných od investora), potrebných pre spracovanie stavebno-technologickej prípravy stavieb?

60 % respondentov odpovedalo, že podklady sú dostatočné ale podrobnosť podkladov nie je dostatočná.

2. Vo funkcii zhotoviteľa, pri realizácii stavby, máte k dispozícii projekt pre realizáciu stavby alebo ste nútení stavbu realizovať podľa dokumentácie pre stavebné konanie?

60 % respondentov odpovedalo, že vo väčšine prípadov (50-100%) majú k dispozícii projektovú dokumentáciu pre realizáciu stavby a 40% odpovedalo, že vo väčšine prípadov majú k dispozícii projektovú dokumentáciu pre stavebné povolenie.

3. Je podľa vášho názoru problematickou časťou ponuky, kalkulácia vedľajších rozpočtových nákladov (VRN) a ich uplatnenie v ponukovej cene zákazky?

60% respondentov odpovedalo na túto otázku, že kalkulácia VRN nie je problematická, ich uplatnenie v ponukovej cene je problematické.

4. Uplatňovali ste si ako zhotoviteľ ušlý zisk na zákazke?

10 % respondentov potvrdilo, že si v minulosti už uplatňovali ušlý zisk na stavebnej zákazke.

5. Považujete disponibilnú dĺžku časového obdobia pre spracovanie kvalitnej cenovej ponuky za vyhovujúcu / postačujúcu?

60 % respondentov odpovedalo, že dĺžka časového obdobia pre spracovanie kvalitnej cenovej ponuky je menej postačujúci.

Z daného prieskumu vyplýva, že zhotovitelia majú pri príprave stavieb problémy, ako sú:

- Nedostatočný časový priestor pre vyhotovenie kvalitnej cenovej ponuky.
- Nedostatok podkladov, poskytnutých od objednávateľa stavby, ktoré sú v nedostatočnej kvalite, (obstarávateľ, investor, stavebník).
- Nedostatočná podrobnosť spracovania projektovej dokumentácie ako podkladu pre spracovanie stavebno-technologickej prípravy a aj cenovej ponuky zhotoviteľa .
- Problematické dokazovanie pre uplatnenie vedľajších rozpočtových nákladov (VRN) v ponukovej cene zákazky.
- Neoprávnené odstúpenie objednávateľa od zmluvy o dielo a následné spory o ušlý zisk zo stany zhotoviteľa.

4 Ušlý zisk ako jeden z problémov vznikajúcich z nekvalitnej prípravy stavby

Zákon č. 513/1991 Zb. oddiel 3, § 379, hovorí o nároku ušlého zisku nasledovne: „*Ak tento zákon neustanovuje inak, nahrádza sa skutočná škoda a ušlý zisk. Nenahrádza sa škoda, ktorá prevyšuje škodu, ktorú povinná strana v čase vzniku záväzkového vzťahu ako možný dôsledok porušenia svojej povinnosti predvídala alebo ktorú bolo možné predvídať s prihliadnutím na skutočnosti, ktoré v uvedenom čase povinná strana poznala alebo mala poznať pri obvyklej starostlivosti.*“ [6]

Ušlý zisk bol definovaný podľa uznesenia Najvyššieho súdu, sp. zn. 4 Cdo 319/2008, zo dňa 28. apríla 2010 takto: „*Ušlý zisk je ujmom spočívajúcou v tom, že u poškodeného nedošlo v dôsledku škodnej udalosti k rozmnoženiu majetkových hodnôt, hoci sa to s ohľadom na pravidelný beh vecí dalo očakávať. Ušlý zisk sa neprejavuje zmenšením majetku poškodeného (úbytkom aktív, ako je to u skutočnej škody), ale stratou očakávaného prínosu (výnosu). Nestačí pritom iba pravdepodobnosť rozmnoženia majetku, lebo musí byť naisto postavené, že pri pravidelnom behu vecí (nebyť protiprávneho konania škodcu alebo škodnej udalosti) mohol poškodený dôvodne očakávať zväčšenie svojho majetku, ku ktorému nedošlo práve v dôsledku konania škodcu (škodnej udalosti).*“ [2]

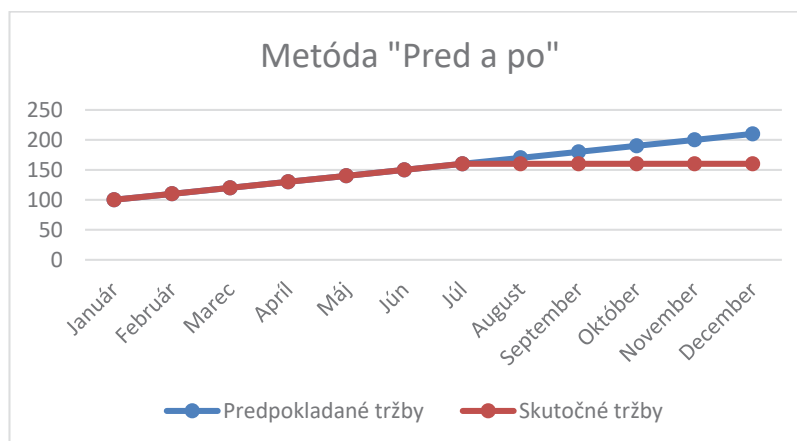
Z uvedenej definície teda vyplýva, že v prípade neodôvodneného v resp. neoprávneného odstúpenia objednávateľa od zmluvy o dielo, má zhotoviteľ nárok na tento ušlý zisk, ktorý sa vypočíta ako cena o ktorú by zhotoviteľ zvýšil svoje tržby v prípade, keď by zhotoviteľ dokončil dielo v plnom rozsahu.

5 Metódy výpočtu ušlého zisku v stavebnej praxi

V súčasnosti sa na kalkuláciu ušlého zisku využívajú nasledujúce metódy:

5.1 Metóda „Pred a po“ (Before and After)

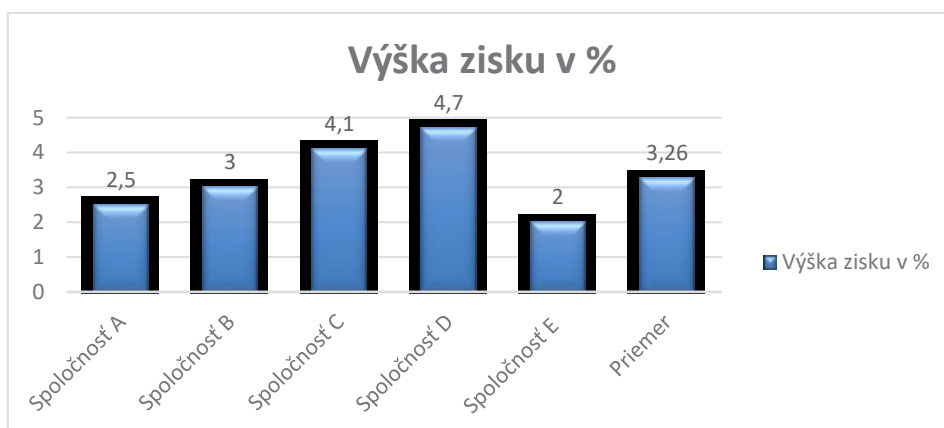
Táto metóda porovnáva na základe účtovných dokladov od zhotoviteľa jeho ziskovosť v predpokladaných tržbách a skutočne dosiahnutých tržbách. Vďaka daným údajom je možné odhadnúť, aké zisky by mal zhotoviteľ v prípade, ak by nedošlo zo strany objednávateľa k protiprávnemu konaniu. Táto metóda zohľadňuje všetky trhové trendy a iné vplyvy, ktoré môžu prispieť k nepresnému odhadu. [3] Vzhľadom na svoju jednoduchosť je táto metóda jedna z najpoužívanejších metód určenia výšky ušlého zisku aj v zahraničí. Príklad tejto metódy môžeme sledovať na nasledujúcom jednoduchom grafe za predpokladu, že fiktívna spoločnosť zhotoviteľa pracuje len na jednej zákazke pre objednávateľa, ktorý v priebehu výstavby odstúpi od zmluvy o dielo.



Graf 5.2.1 Grafické znázornenie metódy „Pred a po“

5.2 Porovnávacíá metóda (Yardstick)

Táto metóda je v podstate porovnávacíá metóda, keďže používa porovnávacíu analýzu pre kalkuláciu ušlého zisku. V rámci tejto metódy je zaužívané porovnávanie ziskovosti a výnosnosti iných spoločností v danom odvetví (v našom prípade v stavebnom odvetví). V tejto metóde určovateľ ušlého zisku zisťuje rôzne špecifiká zákazky – napr. uzatváranie zmlúv na technologicky podobnú prácu a v podobnom alebo v rovnakom regióne. Výpočet ušlého zisku pomocou tejto metódy je založený na predpoklade, že poškodená spoločnosť by vykonala porovnateľnú činnosť s inými podnikmi, ak by nebola poškodená; prípadne môže byť použitý priemer ziskov viacerých spoločností, ktoré majú podobné parametre, ako poškodená spoločnosť. [3] Tento postup môžeme sledovať na nasledujúcom grafe.



Graf 5.2.1 Grafické zobrazenie vstupov do porovnávacíe metódy

Táto porovnávacíá metóda sa zvyčajne používa v prípadoch, keď nemôžeme spoľahlivo určiť ziskovosť zhotoviteľa v takej miere, aby sme použili metódu „Pred a po“. Použitie tejto metódy vyžaduje prieskum trhu a znalosti o hospodárení spoločností v stavebnom odvetví.

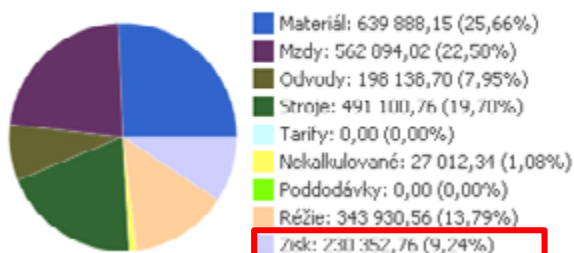
5.3 Metóda použítia konkrétnych zmluvných podmienok

V niektorých prípadoch je možné kalkulovať ušlý zisk podľa vopred konkrétne dohodnutých kvantitatívnych podmienok v zmluve o dielo. Túto metódu je však možné použiť len v prípadoch, ak vopred dohodnutá zmluva o dielo obsahuje konkrétne podmienky, ktoré majú byť použité pre kalkuláciu zisku. [3] V prípade existencie takejto zmluvy, by k uplatňovaniu ušlého zisku spravidla nedošlo.

5.4 Metóda použítia oceňovacích nástrojov

Najrozšírenejšou metódou používanou v stavebnej praxi pre vyčíslenie ušlého zisku, je metóda použítia existujúcich oceňovacích podkladov a databáz orientačných cien. Za týmto účelom je možné využiť oceňovacie nástroje akým je napríklad software CenKros 4, ktorý používa pre databázu orientačných cien stavebných a montážnych prác kalkulačné členenie nákladov a samostatnej ekonomickej kategórie – zisku. Toto používané kalkulačné členenie umožňuje v ďalšom postupe vykalkulovať aj mieru zisku s prislúchajúcim percentom z celkovej ceny stavebnej zákazky.

Kalkulačné členenie nákladov



Graf 5.4.1 Zobrazenie štruktúry kalkulačného členenia nákladov a zisku na zákazke [4].

6 Modelový príklad

Pri kalkulácii ušlého zisku na modelovom príklade z našej stavebnej praxe, sme aplikovali Porovnávaciu metódu „Yardstick“ a metódu použitia oceňovacích nástrojov, konkrétne software Cenkos 4. Metódu „Pred a po“ sme nemohli využiť, pretože nám neboli v rámci prieskumu poskytnuté účtovné doklady danej spoločnosti. Metódu použitia konkrétnych zmluvných podmienok sme nemohli použiť, vzhľadom k skutočnosti, že v zmluve o dielo nebola stanovená dohodnutá výška zisku na zákazke, ani spôsob jeho kalkulovania (t. j. z akej základne a v akej výške).

V príklade, ktorý je uvedený v časti 6.1 a 6.2, sa zmluvné strany dohodli na realizácii stavebných prác v hodnote 50.122 EUR. Cena diela bola v zmluve dohodnutá ako pevná cena. Zhotoviteľ vykonal práce v hodnote 17 842 EUR, ktoré boli vyfakturované a objednávateľom aj uhradené. Následne sa objednávateľ dostal do platobnej neschopnosti a zmluvné práce boli zastavené. Zhotoviteľ po dvoch týždňoch odstúpil od zmluvy o dielo a nárokoval si ušlý zisk na tejto zákazke.

6.1 Kalkulácia ušlého zisku pomocou Porovnávacej metódy

Pre použitie tejto metódy sme vykonali prieskum tržieb a ziskov stavebných spoločností s približne podobnými parametrami ako predmetná spoločnosť. Výsledky prieskumu sa nachádzajú v nasledujúcej tabuľke. Keďže posledné údaje boli v čase publikovania z roku 2017, použili sme tieto posledné známe štatistické údaje.

Tabuľka č. 6.1.1 Tržby a zisky po zdanení stavebných spoločností v roku 2017 [5]

| Spoločnosť | Tržby 2017 (tis. Eur) | Zisk po zdanení 2017 (tis. Eur) | ZISK (%) |
|--|-----------------------|---------------------------------|----------|
| Strabag Pozemné a inžinierske staviteľstvo, s.r.o., Bratislava | 396 430 | 6 771 | 1,7080% |
| Doprastav, a.s., Bratislava | 290 979 | 29 355 | 10,0884% |
| Strabag s.r.o. Bratislava | 185 696 | 11 615 | 6,2548% |
| Eurovia SK, a.s. Košice | 167 522 | 112 317 | 67,0461% |
| Skanska SK, a.s. Bratislava | 111 425 | 595 | 0,5340% |
| Goldbeck, s.r.o. Bratislava | 103 126 | 6 526 | 6,3282% |
| VUJE, a.s. Trnava | 90 038 | 5 855 | 6,5028% |
| Váhostav-SK, a.s., Bratislava | 82 729 | 150 | 0,1813% |
| TSS Grade, a.s., Bratislava | 76 559 | 1 470 | 1,9201% |
| Inžinierske stavby, a.s., Košice | 63 465 | 5 827 | 9,1814% |
| DSC, a.s., Bratislava | 61 261 | 7 336 | 11,9750% |

| | | | |
|--|------------------|----------------|----------------|
| Cesty Nitra, a.s., Nitra | 60 325 | 2 981 | 4,9416% |
| Chemkostav, a.s., Michalovce | 59 306 | 737 | 1,2427% |
| HB Reavis Managment, s.r.o., Bratislava | 58 294 | -7 395 | -12,6857% |
| Ingsteel, s.r.o., Bratislava | 57 083 | 675 | 1,1825% |
| PRIEMERNÝ ZISK (μ) | 1 864 238 | 184 815 | 9,9137% |

Z uvedených údajov vyplýva, že priemerný zisk stavebných spoločností v roku 2017, bol 9,91 %.

Kalkulácia ušlého zisku podľa vzťahu:

$$UZ = Zc * \mu / 100 \quad (1)$$

kde UZ je ušlý zisk, Zc je zostatková cena nedokončených prác, μ je priemer zisku obdobných spoločností

Po dosadení hodnôt do vzorca dostaneme výsledok

$$UZ = 32280 * 9,9137 / 100 = \mathbf{3\ 200,14\ EUR}$$

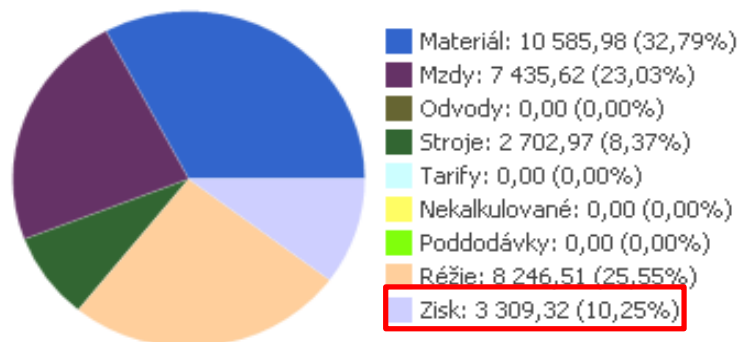
6.2 Kalkulácia ušlého zisku pomocou metódy použitia oceňovacích nástrojov (Cenkros 4)

Pri tejto metóde sme použili databázu orientačných cien softwaru Cenkros 4 so zvolením cenovej databázy II.Q/2017, kvôli rovnakej cenovej úrovni, v akej bola aplikovaná predchádzajúca metóda (časť 6.1).

Postup sme aplikovali v troch krokoch:

1. V danej cenovej úrovni (v programe; v databáze II.Q/2017) sme spracovali rozpočet nedokončených stavebných prác na uvedenej stavbe.
2. Z rozpočtu sme zistili vykalkulovanú cenu nedokončených prác vo výške 32 280 EUR.
3. V programe sme použili funkciu „zobrazenie kalkulačného členenia,“ ktoré znázorňuje graf 6.2.1. Z uvedeného grafu môžeme určiť výšku zisku na zákazke, ktorý kalkuloval software Cenkros 4 s pomocou použitého kalkulačného vzorca, v kalkulačnom členení nákladov a zisku, a to vo výške 10,25 % zo zostatkovej ceny nedokončených prác, čo predstavuje sumu 3 309 EUR.

Kalkulačné členenie nákladov



Graf 6.2.1 Zobrazenie štruktúry kalkulačného členenia nákladov a výšky kalkulovaného zisku na zákazke [4]

7 Záver

Pri výpočte ušlého zisku dvomi rôznymi metódami, môžeme sledovať minimálny rozdiel medzi jednotlivými výstupnými hodnotami. Zatiaľ, čo ušlý zisk vypočítaný pomocou porovnávacej metódy „Yardstick“ sa rovná sume 3 200,14 EUR, ušlý zisk vypočítaný pomocou metódy použitia oceňovacích nástrojov (Cenkros 4), predstavuje sumu 3 309 EUR. Obe metódy majú podobné

výsledky a teda aj rovnocenné využitie v našej stavebnej praxi, pričom z hľadiska verifikácie odporúčame použiť súbežne obidve metódy.

Ušlý zisk možno považovať len za jeden možný následok nedôslednej alebo zanedbanej prípravy stavby, a to len z pohľadu dvoch účastníkov investičného procesu (investora-stavebníka a zhotoviteľa). V tomto konkrétnom prípade sa jedná o nedôsledné a nedostatočné plánovanie finančných prostriedkov na realizáciu, zo strany investora. Možných následkov na základe ďalších kombinácií činností ostatných účastníkov a legislatívneho procesu je však oveľa viac.

Vo svojej dizertačnej práci sa preto chcem zamerať na analýzu podstatných dopadov nedôslednej prípravy stavieb zo strán všetkých účastníkov procesu a na ich základe zostaviť aktuálny model správania sa účastníkov v etape prípravy stavieb, s cieľom maximálne eliminovať negatívne dopady nedostatočnej prípravy stavieb na hospodárenie jednotlivých subjektov výstavby.

Literatúra

- [1] ELLINGEROVÁ, H.: Analýza nákladov stavebného diela v investičnom procese. Nakladateľstvo STU 2015, ISBN 978-80-227-4345-7
- [2] HARUMOVÁ, A.: Stanovenie hodnoty III. – Stanovenie hodnoty škody a ušlého zisku. Ecoletra Delaware, ISBN 978-194709917-3
- [3] BENARROCHE, A.: Claims for Lost Profits Are Difficult to Prove | Construction Claims, LEVELSET 30.4. 2019, ISBN 80-8076-032-2
- [4] Software Cenkos 4, Spoločnosť KROS a.s., Databáza II.Q 2017,
- [5] TREND Analyses, Zisky stavebných firiem 2017,2018, dostupné na <https://www.etrend.sk/clanky-autora/3-trend-analyses.html> [Online]
- [6] Zákon č. 513/1991 Zb. oddiel 3, § 379

Pavol Mayer¹

Študijný program: Technológia stavieb, ročník: 3.

ANALÝZA MOŽNOSTÍ VYUŽITIA BIM A BEZDRÔTOVÝCH SENZOROV NA ÚČELY BOZP

ANALYSIS OF OPTIONS OF BIM AND WIRELESS SENSORS USAGE FOR HEALTH AND SAFETY PURPOSES

Several health and safety studies says, that construction is one of the most dangerous industries. In todays practice, traditional methods of measuring values, that affect health and safety of workers on construction site and then evaluate them are time and personnel intensive. Wireless sensors connected with server could measure different values automatically. Additionally, if they are connected with BIM model in real time, it is possible to warn user by showing him the danger in his smart device. The aim of this article is to analyze today technologies and workflows, which solve this topic.

1. Úvod

Podľa medzinárodných štatistík v problematike bezpečnosti a ochrany zdravia pri práci, patrí stavebníctvo medzi odvetvia s najväčším výskytom pracovných úrazov. [1] [2] Výskumy ukazujú, že medzi hlavné dôvody nehôd patrí unikátnosť jednotlivých pracovísk, náročné podmienky na stavenisku, ľudské správanie, rozhodnutia a manažment BOZP na nízkej úrovni, čo vedie k nebezpečným pracovným postupom, metódam a použitiu nebezpečného vybavenia.

Informačné modelovanie stavieb (BIM) je možné využiť aj vo fáze realizácie stavebného diela. Medzi najčastejšie využitie patrí práca s 3D BIM modelom, v ktorom si manažment stavby vie jednoducho vyhľadať potrebné informácie o jednotlivých konštrukciách a materiáloch, vytvoriť priestorový rez na akomkoľvek mieste a pod. V realizácii je vhodné taktiež využitie 4D BIM modelov – simulácii výstavby. Stále častejšie sa však začínajú pri realizácii využívať tzv. CDE (Common Data Environment) systémy, ktoré umožňujú zdieľanie BIM modelov, projektovej dokumentácie, fotografií a pod. v spoločnom prostredí na „cloud“ všetkým účastníkom výstavby. Ich ďalším benefitom je možnosť komunikácie a výmena informácií o stavbe v reálnom čase.

Bezdrôtové senzory majú rôzne využitie a merajú rôzne veličiny a hodnoty ako napr.: teplotu, vlhkosť, CO₂, kyslík, pohyb a iné. Takéto senzory je možné prepojiť a ich hodnoty (databázu nameraných hodnôt) odosielať do BIM modelu (databáza informácií o stavbe), vďaka čomu sa namerané hodnoty môžu zobrazit' v konkrétnom priestore informačného modelu stavby, vizuálne odlišovať od iných hodnôt, resp. konkrétny softvér nastaviť tak, aby užívateľ automaticky upozornil, ak niektorá z hodnôt prekročí limitný stav, alebo pod neho klesne.

¹ Pavol Mayer , Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Prepojenie BIM modelu a bezdrôtových senzorov na meranie teploty a hodnoty kyslíka v uzavretom priestore

Využitie bezdrôtových senzorov s názvom CoSMoS na zvýšenie bezpečnosti pri práci vyvinuli autori Zainab Riaz, M. Arslan a Adnan K. Kiani z Národnej Univerzity Vied a Technológie v Islamabade v Pakistane (National University of Sciences and Technology – NUST) a Salman Azhar z McWorther School of Building Science v Auburne v USA. Predmetom ich riešenia sa stali uzavreté priestory a pracoviská, na ktorých dochádza k teplotným extrémom, alebo nedostatku, či prebytku kyslíka.

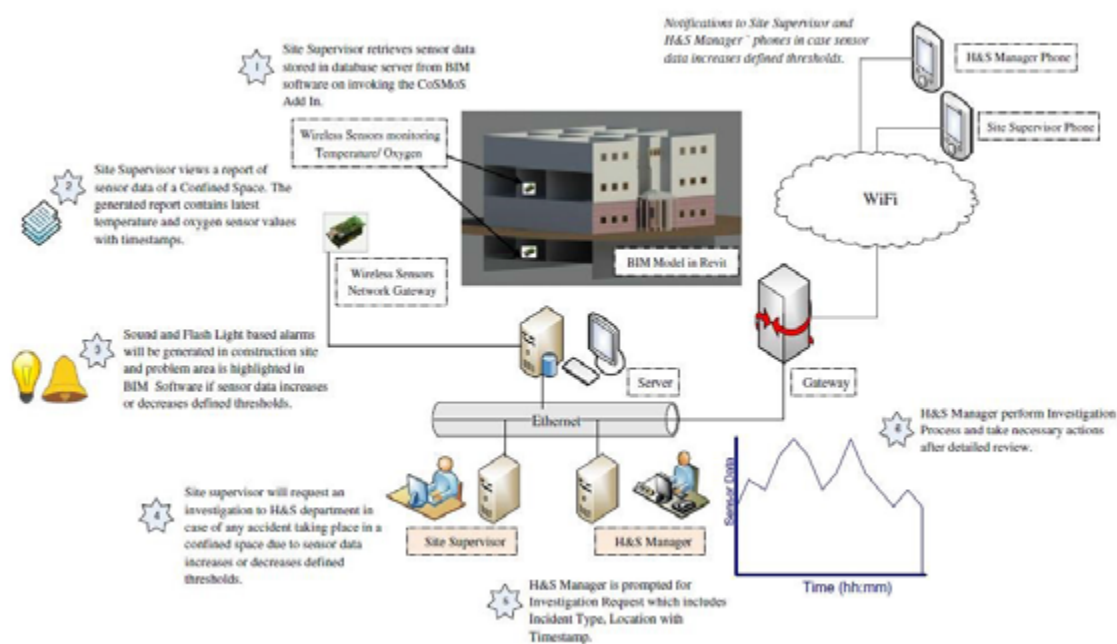


Figure 1 – CoSMoS scenario diagram

OSHA (Occupational Safety and Health Administration), definuje uzavretý priestor ako: „akýkoľvek priestor, ktorý má obmedzené možnosti na vstup, alebo východ a ktorý nebol primárne navrhnutý na účely kontinuálnej pracovnej aktivity, je uzavretým priestorom“ (Occupational Safety and Health Administration, 2019). Ide napríklad o nádrže, kotly, zásobníky, silá a slabo ventilované izby, alebo priestory [3]. Štatutárny orgán austrálskej vlády – Safe Work Australia stanovil horný a dolný limit na obsah kyslíka na pracovisku. Odporúčajú, aby bol kyslík na pracovisku neustále monitorovaný a jeho obsah by nemal klesnúť pod 19,5% a presiahnuť 23,5%, v opačnom prípade, by vstup na pracovisko mal byť zakázaný. OSHA stanovila horný limit na 22% a spodný rovnako na 19,5%. Britská Health and Safety Executive (HSE) určila horný limit na 20,8% a spodný na 16%. Z uvedených odporúčaní vyplýva, že teplota a kyslík by mali byť na pracovisku efektívne monitorované, aby sa tak zvýšila bezpečnosť pracovníkov. [3]

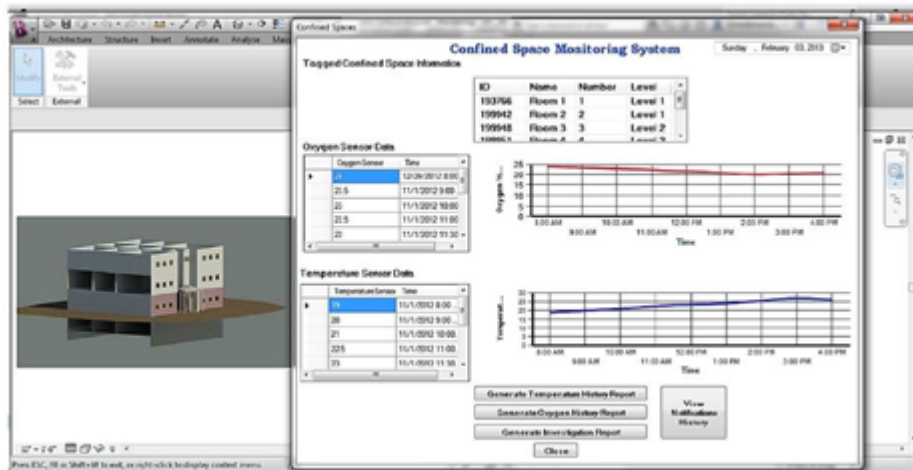


Figure 2 - External application from Revit GUI, that shows oxygen content and temperature [3]

Riaz a kolektív na riešenie tejto problematiky aplikovali technológiu siete bezdrôtových senzorov (WSN – Wireless Sensors Network) a jej prepojenie s BIM modelom. Na riešenej stavbe aplikovali tri bezdrôtové senzory značky TelosB® od výrobcu Crossbow Technology®, ktoré merajú teplotu, vlhkosť a svetlo, do dvoch menej ventilovaných uzavretých miestností. Na stavbe sa vytvorila ethernetová sieť, SQL server (Database Management System – systém na riadenie databáz), na ktorý sa zaznamenávali údaje zo senzorov a taktiež samostatná sieť senzorov, ktorá sa vytvorila pomocou riešenia Visual Studio.Net® - prostredia na vývoj softvéru (Software Development Environment). SQL server následne prepojili pomocou API (Application Programming Interface – rozhranie pre programovanie aplikácií) so softvérom Autodesk® Revit®, v ktorom bol vytvorený BIM model riešenej stavby, s vyznačenými polohami senzorov a riešených miestností.



Figure 3– Temperature history report. Figure 4 - Different surface and boundary color shows different status of sensor readings (temperature, oxygen) in confined space. [3]

Dáta zo senzorov sa zaznamenávali každých 15 minút do databázy. Tie boli následne prenášané do BIM modelu, kde sa farebne vizualizovali – vytvárali sa farebné škály teploty a vzduchu. [3]

Ak teplota, alebo kyslík v uzavretom a zle vetranom priestore prekročí spodnú, alebo vrchnú hranicu, je potrebné, aby sa takáto informácia dostala k zodpovednej osobe čo najskôr. Riaz a kolektív vyvinuli aplikáciu pre mobilné zariadenia s názvom CoSMoS® pre operačný systém Android®. Dáta zo senzorov je vďaka nej možné odosielať aj do mobilných zariadení a upozorniť kompetentných na nebezpečné prekročenie hraníc hodnôt kyslíka a teploty. [3]

3. Prepojenie BIM modelu a technológie RTLS

Medzi inovatívne technológie využívajúce BIM na účely bezpečnosti pri práci na stavenisku je systém lokalizácie v reálnom čase s názvom „RTLS“ (z angl. Real Time Location System) využívajúci GPS v interiéri. Signál GPS, ktorý sa používa napr. pri navigácii automobilov nie je možné použiť v interiéri. RTLS využíva snímače pohybu a server, ktorý signál prenáša aj do vnútorných priestorov a tak dokáže užívateľovi zobrazit' informácie o polohe a pohybe ľudí a vecí v reálnom čase v interiéri aj exteriéri. [4]

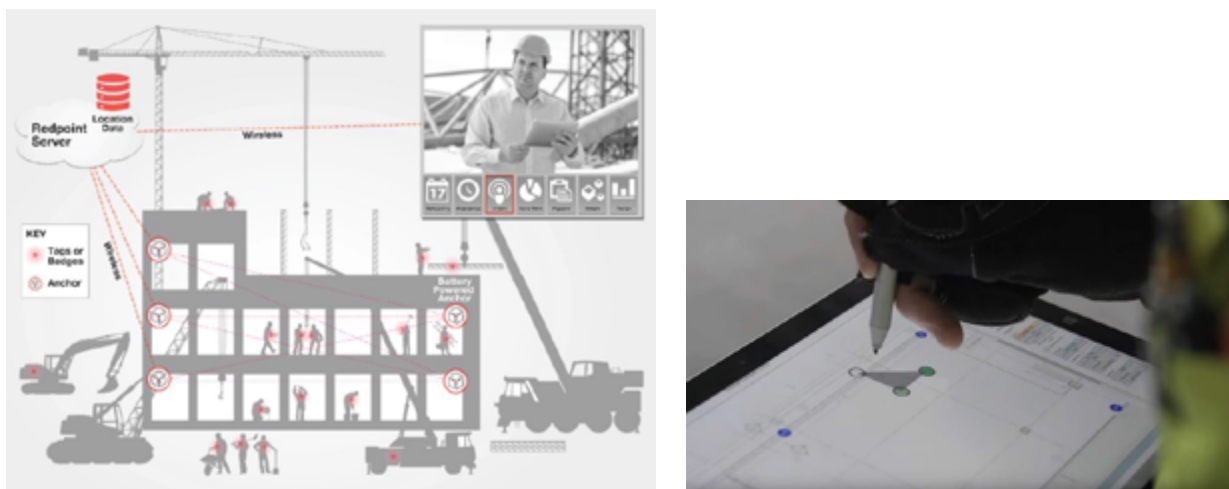


Figure 4 – Graphic scheme of RTLS by Redpoint Positioning and Figure 5 – Drawing of risk zone into RTLS tablet application by user from construction site. [4]

Systém pozostáva zo senzorov pevne umiestnených v priestoroch stavby, ktoré bezdrôtovo vysielajú a prijímajú signál. Súčasťou RTLS sú aj čipy, ktoré je možné umiestniť na stroje, alebo odev pracovníkov. Sensory vyhodnocujú polohu čipov a odosielajú tieto informácie na server v reálnom čase. Následne sa tieto informácie na serveri spracujú a odosielajú do inteligentných mobilných zariadení užívateľov. Pohyb osôb je možné zobrazit' v aplikácii v 2D aj v 3D. Užívateľ (napríklad stavbyvedúci, alebo technik BOZP), môže priamo vo svojom tablete vyznačit' priestor, ktorý predstavuje nebezpečenstvo, alebo riziko. V prípade, že pracovník s čipom prekročí hranicu tohto priestoru, systém upozorní všetkých užívateľov tým, že krúžok predstavujúci pracovníka sa rozblíka. Čip je možné prepojiť so špeciálnou reflexnou vestou s červenými výstražnými svetielkami a po vstupe pracovníka do priestoru vesta začne blikať a tak upozorní samotného pracovníka, že by mal tento priestor opustiť. [4]

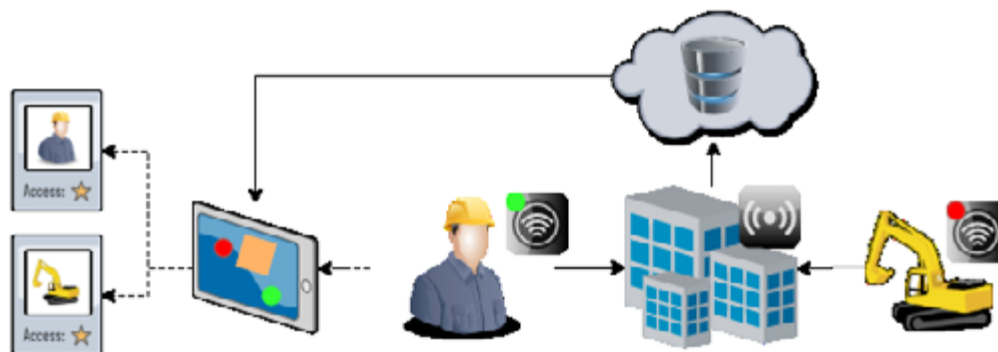


Figure 6 – Diagram of workflow in RTLS system. [author]

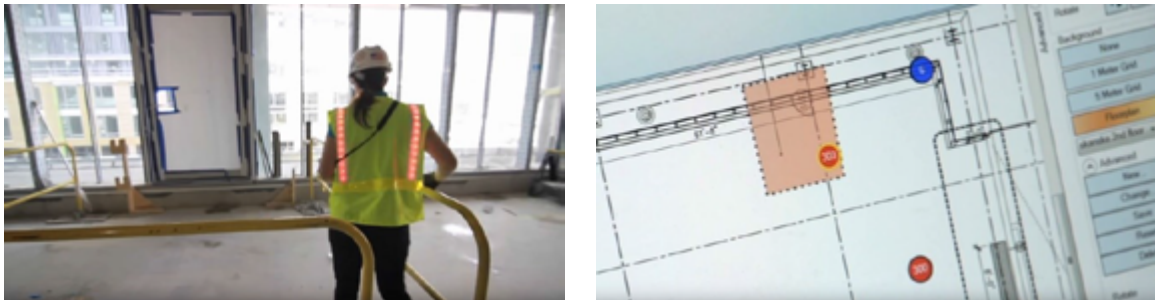


Figure 7 – Chip connected with safety vest warns worker with red blinking lights, that he/she is in risk/dangerous zone.

Systém RTLS zaznamenáva všetky porušenia disciplíny a trasy pracovníkov počas celej výstavby. Každý z nich má v systéme zadané meno a firmu, pre ktorú pracuje. Vďaka tomu je možné nielen v reálnom čase pozorovať ich činnosť, ale aj spätne evidovať a vyhodnocovať dochádzku, pracovný výkon a disciplinovanosť. Výrobca v budúcnosti plánuje vývoj tlačidla, ktoré umožní pracovníkovi privolať pomoc. Ostatní užívatelia budú na to upozornení a pomocou tohto systému rýchlo identifikujú o akého pracovníka ide a kde potrebuje pomoc. Integrovaním displeja k čipom, by bolo možné navigovať zraneného, alebo ohrozeného pracovníka po evakuačnej ceste do bezpečia. RTLS sa tiež využíva vo výrobných halách, skladoch či nemocniciach. [4] Obdobnou problematikou sa vo svojom výskume venovali aj [10] – pomocou monitorovania mechanizmov a pracovníkov v reálnom čase spracovali metodiku na varovanie pracovníkov pred nebezpečenstvom.

4. Záver

Analýza súčasného stavu problematiky v oblasti využitia bezdrôtových senzorov a ich prepojenia s BIM modelom preukázala, že prenášať informácie o nameraných hodnotách z jednotlivých senzorov do BIM modelov je možné viacerými spôsobmi. Oba opísané systémy majú vlastnosť upozorniť užívateľa – napr. manažment stavby, alebo technika BOZP o limitných hodnotách, ktoré môžu ohroziť pracovníka (napr. zvýšená teplota, nedostatok kyslíka, alebo vstup pracovníka do priestoru s rizikom). Takéto systémy by mohli prispieť k rýchlejšej informovanosti kompetentných osôb a tak zefektívniť proces riešenia problému a zabrániť ohrozeniu pracovníkov. Je zrejmé, že mnohé veličiny by na stavbách bolo potrebné zaznamenávať a vyhodnocovať, aby sa predišlo ohrozeniu pracovníkov, avšak použitím tradičných metód je tento proces personálne a časovo náročný. Spomínané systémy komunikujúce s BIM modelmi, tento proces podstatne zefektívňujú.

5. PodĎakovanie

„Tento článok vznikol vďaka podpore Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied pre projektu VEGA-1/0506/18“.

„This publication was created with the support of the Scientific Grant Agency of the Ministry of Education, science, research and sport of the Slovak Republic and the Slovak Academy of Sciences for the project VEGA-1/0506/18“

Literatúra

- [1] HUANG, X., HINZE, J., *Owner's role in construction safety*, J. Constr. Eng.Manag. 132 (2) (2006) 164–173.
- [2] MELZNER, J., ZHANG, S., TEIZER, J., BARGSTÄDT, H.J., *A case study on automated safety compliance checking to assist fall protection design and planning in building information models*, J. Constr. Manag. Econ. 31 (6) (2013) 661–674.
- [3] RIAZ, Z., a iní. *CoSMoS: A BIM and wireless sensor based integrated solution for worker safety in confined spaces*. Automation in Construction. 2014, 45, s. 96-106
- [4] FUNTÍK, T., a iní. *BUILDING INFORMATION MODELING - Informačné modelovanie stavieb*. Bratislava:VYDAVATEĽSTVO EUROSTAV, spol. s.r.o., 2018. ISBN 978-80-89228-56-0.
- [5] FUNTÍK, T., MAYER, P., GAŠPARÍK, J., *The automation of the process of updating the curing time activity in 4D schedule*. In ISARC 2018 - 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and International AEC/FM Hackathon: The Future of Building Things. Berlin, Germany, July 20-25, 2018. V databáze: SCOPUS
- [6] FUNTÍK, T. - GAŠPARÍK, J. *Site plan development: Tower crane placement based on data obtained from IFC file*. In ISARC 2016 : proceedings of the 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining. Auburn, Alabama, USA, July 18-21, 2016. [s.l.] : International Association for Automation and Robotics in Construction (I.A.A.R.C), 2016, S. 33-37. ISBN 978-1-5108-2992-3. V databáze: SCOPUS
- [7] FUNTÍK, T.- ERDÉLYI, J. - ĎUBEK, M. - GAŠPARÍK, J. *Innovative assessment of selected properties of industrial floors*. In ISARC 2016 : proceedings of the 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining. Auburn, Alabama, USA, July 18-21, 2016. [s.l.] : International Association for Automation and Robotics in Construction (I.A.A.R.C), 2016, S. 93-100. ISBN 978-1-5108-2992-3. V databáze: SCOPUS
- [8] FUNTÍK, T. *Informačné modelovanie stavby ako nástroj pre efektívnu správu životného cyklu*. 1. vyd. Brno : Tribun EU, 2017. 114 s. ISBN 978-80-263-1369-4.
- [9] FUNTÍK, T. *Otvorená výmena dát v BIM*. Eurostav. Roč. 22, č. 3 (2016), s. 60-61. ISSN 1335-1249.
- [10] HENG, Li., a iní. *Intrusion warning and assessment method for site safety enhancement*. Safety Science. 2016, 84, s. 97-107.
- [11] HULÍNOVÁ, Z., *Bezpečnosť a ochrana zdravia pri práci v stavebníctve*. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2005. s. 112. ISBN 80-227-2214-6.
- [12] HULÍNOVÁ, Z., a iní. *Effectiveness of costs incurred for labor protection*. ADVANCES AND TRENDS IN ENGINEERING SCIENCES AND TECHNOLOGIES II. 2017, s. 425-431.
- [13] HULÍNOVÁ, Z., a iní. *Risk management system (RMS)*. 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies (ESaT). 2016.

Patrik Šťastný¹

Študijný program: Technológia stavieb (3.stupeň), ročník: 2.

ANALÝZA VYBRANÝCH TECHNOLOGIÍ DODATOČNEJ PROTIVLHKOSTNEJ IZOLÁCIE HISTORICKÝCH KONŠTRUKCIÍ

ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR SUPPLEMENTARY INSULATION OF HISTORIC CONSTRUCTIONS AGAINST MOISTURE

Abstrakt

Primary research is focused on proving the necessity of creating additional insulation against moisture by its insertion or by knocking into the masonry damaged by moisture. Undercutting technology is the primary technology and one of the most effective remediation methods. It should be noted that this technology is not suitable for all water-soaked structures and may require a static report before implementation. The method of research is to verify the effectiveness of the undercutting technology in various historical buildings and to record the individual moisture values before, during and after the implementation of the technology in situ and then to investigate the effectiveness of the sanitation plasters on the investigated structure. In this way, real values will be achieved directly from practice, which results will be served as a basis for demonstrating the necessity of using masonry undercutting technology.

Kľúčové slová

sanácia, technológia podrezávania, izolácia historických konštrukcií, protivlhkostná analýza

1. Úvod

Ako na mnohých oblastiach renovácií stavieb, tak aj pri sanácii zavlhnutých konštrukcií historických budov, sa výrazne podísal vývoj stavebných technológií a stavebných výrobkov. Tie sú často založené práve na starších princípoch, ktoré nám v spojení s modernými technológiami a materiálmi vo veľkej miere umožňujú dosiahnuť pozitívne výsledky, ktoré majú za následok nie len zastavenie vlhnutia konštrukcií, ale aj obmedzenie, či dokonca odstránenie solí nachádzajúcich sa na povrchu. [1] Pri mnohých stavbách, či už historických alebo nových sa dnes stretávame s vlhkosťou murív. Príčin vzniku vlhkosti muriva je nespočetné množstvo. V mnohých článkoch a publikáciách sa uvádza ako príčina zavlhnutia muriva historických stavieb absencia hydroizolácie. Pravdou však je, že dané tvrdenie nie je úplne správne, nakoľko už aj v minulosti boli v značnej miere využívané rôzne formy izolácie proti vlhkosti (viď. literárne dielo zo začiatku nášho letopočtu Vitruvius: Deset knih o architektúre), ktoré však bohužiaľ postupom času degenerovali, resp. stratili svoju funkčnosť, nakoľko spomínané systémy vyžadovali priebežnú údržbu. Najmä pri izolácii spodných stavieb boli v značnej miere využívané ílové zásypy, drenáže na zníženie hladiny podzemnej vody [1], asfaltové nátery, ale taktiež sa využívalo obmurovanie pomocou ostro pálených, málo nasiakavých tehál. Práve kvôli danému problému dnes možno pozorovať, že značná časť či už historických, ale aj menej starých budov, je napadnutá rôznymi formami vlhkosti. Tie majú za následok rozpad nie len muriva, ale aj stavebných materiálov, zvyšovanie tepelných strát, ale najmä spôsobujú rôzne ochorenia osobám, ktoré v týchto priestoroch dlhodobo žijú. Z tohto

¹ Patrik Šťastný, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

hľadiska je aj správne používať pre dané metódy označenie sanácia. Tento pojem pochádza z latinského slova sanus a teda zdravý.

2. Rozdelenie technológií dodatočnej protivlhkostnej izolácie

Medzi najrozšírenejšie poruchy budov v rámci nášho klimatického pásma patrí vlhnutie konštrukcií, ktoré je súčasťou väčšiny historických stavieb. Vlhkosť stavebných konštrukcií zapríčiňujú najmä kapilárne vztlínanie, nasiakavosť, difúzia vodných pár, kondenzácia vodných pár atď.[2] Zatriedenie vlhkosti sa neopiera o žiadne tvrdenie prírodných vied. Je spracované len na základe názoru normotvorcov. Na Slovensku a taktiež aj v rámci riešenia nášho výskumu je využívaná česká norma ČSN P 73 0610. Táto norma zatrieďuje vlhkosť do piatich stupňov.

Tabuľka 1 - Stupeň zavlhnutia konštrukcií [ČSN P 73 0610]

| | Stupeň zavlhnutia | Vlhkosť (uM) [%] |
|---|--------------------------------------|------------------|
| 1 | veľmi nízka vlhkosť | < 3,0 |
| 2 | nízka vlhkosť | 3,0 - 5,0 |
| 3 | zvýšená vlhkosť | 5,0 – 7,5 |
| 4 | vysoká vlhkosť | 7,5 – 10 |
| 5 | veľmi vysoká vlhkosť (až zamokrenie) | > 10 |

Technológie, využívané na dodatočnú protivlhkostnú analýzu sa najčastejšie delia podľa stavebno-fyzikálneho hľadiska do nasledujúcich skupín:

1. Technológie zabezpečujúce odvetrávanie
2. Technológie vytvorenia dodatočných nepriepustných vrstiev
3. Technológie vytvorenia kryštalických clôn
4. Technológie využívajúce elektrofyzikálne princípy
5. Technológie zohrievania konštrukcií
6. Doplnkové technológie (odsoľovanie muriva, sanačné omietky a pod.)
7. Súvisiace technológie (drenáže a pod.)

Česká odborná literatúra taktiež uvádza zatriedenie týchto skupín na priame a nepriame metódy. Medzi priame patrí prvých päť skupín. Medzi nepriame patrí siedma skupina. Šiestu skupinu česká odborná literatúra neuvádza. [3]

2.1 Technológie vytvorenia dodatočných nepriepustných vrstiev

Princípom týchto technológií je vytvorenie pevnej bariéry tzv. izolačnej clony. Aplikácia tejto bariéry spočíva v jej vsunutí, vložení, alebo vtláčení hydroizolácie priamo do prierezu sanovaného muriva. [4,5,6] V praxi sa využívajú rôzne stavebné materiály počnúc asfaltovými pásmi hrubými asi 4-5 mm až po rôzne profilované plechy z veľmi tvrdej ocele (chrómniklovej, chrómovej,...), ktoré sa prekrývajú v spojoch o dve až tri vlny daného plechu. K týmto technológiám sa taktiež radí premurovanie izolačnej škáry. Tento spôsob patrí k jednému z najstarších spôsobov sanácie zavlhnutých konštrukcií. Tu je však treba dodať, že realizácia tejto technológie je možná len ak je väzba muriva tvorená pravidelným ukladaním tehál, resp. plochých kameňov.[1]

V tomto príspevku sa zameriame na technológiu podrezávania muriva.

2.1.1 Postup realizácie podrezávania muriva

Podrezávanie muriva je bežnou technológiou vytvárania a realizácie novej, dodatočnej izolácie proti vlhkosti. Moderné technológie umožnili realizáciu tejto technológie v rôznych druhoch muriva. Pracovný záber pre vytvorenie úložnej škáry a vloženie izolácie je 0,3 až 0,5 m. Pred samotným vkladáním je potrebné, aby bola škára dôkladne vyčistená z dôvodu plynulého a bezproblémového vkladania izolačných pásov. Po vytvorení a vyčistení škáry, ktorá je obvykle hrubá približne 2-3 cm, sa pristúpi k vkladaniu časti hydroizolácie a následnému vyklinovaniu škáry proti sadaniu podrezávaného muriva. Vyklinovanie sa realizuje napríklad klinmi z tvrdého dreva, plastov a podobne. Treba klásť dôraz na presahy jednotlivých izolačných pásov, ktoré by nemali byť menšie ako 5 cm. Po vyklinovaní sa pristupuje k ďalšiemu pracovnému záberu. Následne sa do škáry osadia PVC rúrky a podrezávaná časť sa zaomietá. Následne po zatvrdnutí omietky vyplníme škáru cez PVC rúrky expanznou maltou s nízkym expanzným účinkom. [1]

Typy podrezávania muriva:

1. Podrezávanie muriva ručnou pílou
2. Podrezávanie muriva kotúčovou pílou (dnes sa veľmi nepoužíva)
3. Podrezávanie muriva reťazovou pílou (dnes sa veľmi nepoužíva)
4. Podrezávanie muriva diamantový lanom (najpoužívanejší spôsob)

3. Cieľ práce

Primárnym cieľom mojej práce je preukázanie nutnosti vytvárania dodatočnej izolácie proti vlhkosti jej vkladáním, alebo vrázaním do muriva narušeného vlhkosťou. Technológia podrezávania, ako primárna technológia patrí medzi najúčinnnejšie sanačné metódy. Medzi jej prednosti patrí práve vysoká účinnosť (v prípade, že sa dodržali stanovené technologické postupy). Implementácia Benátskej charty však bráni realizácii tejto technológie na pamiatkovo chránených stavbách. To má za následok záporný postoj jednotlivých Krajských pamiatkových úradov k danej technológii, ktorej zásah značne narušá integritu zvislých konštrukcií, kde sa táto izolácia pôvodne nenachádzala. Nutne treba podotknúť, že táto technológia nie je vhodná pre všetky konštrukcie nasiaknuté vodou a pred jej realizáciou môže byť potrebné vypracovať statický posudok.

Metodika výskumu spočíva v overení účinnosti technológie podrezávania v rôznych historických budovách a zaznamenávaní si jednotlivých hodnôt vlhkosti pred, počas a po realizácii tejto technológie in situ a následné skúmanie účinnosti sanačných omietok na skúmanú konštrukciu. Týmto spôsobom budú dosiahnuté reálne hodnoty priamo z praxe, ktorých výsledky budú slúžiť ako podklad preukázania nutnosti využívania technológie podrezávania muriva.

4. Pracovný postup získavania porovnávacích hodnôt

V rámci výskumu sa zrealizujú merania pred realizáciou technológie podrezávania, po realizácii a taktiež po aplikácii sanačných omietok. Prvé meranie bude slúžiť ako porovnávacie pre merania nasledujúce a taktiež bude preukazovať mieru zavlhnutia muriva. Druhé meranie vlhkosti muriva bude nasledovať po zrealizovaní podrezania a bude preukazovať účinnosť tejto technológie. Tretie meranie bude nasledovať s dostatočným časovým odstupom. V prípade možnosti sa pristúpi aj k ďalším meraniam.

Merania budú vykonávané na rôznych miestach objektu, stanovených ešte pred samotnou realizáciou podrezávania. Pre objektívnosť výsledkov bude nutné dodržiavať presne stanovené miesta.

Taktiež budú skúmané viaceré historické stavebné objekty, rôznych typov, lokácií a materiálových zložení z dôvodu čo najobjektívnejších výsledkov výskumu.

5. Výsledky meraní

Dňa 16.5.2017 prebehlo stanovenie bodov a prvé meranie vlhkosti na objekte Zichyho kúria v Rači kontaktným meračom Hygrometer BD2 firmy Dosier Messgeräte, Füssen. Po stanovení bodov a zakreslení do pôdorysu stavby (pre budúce merania) sa pristúpilo k meraniu vlhkosti. Kúria vykazovala vysokú mieru zavlhnutia v niektorých miestach zamokrenie podľa ČSN P 73 0610. Merania boli uskutočnené v polovici mája, kedy bola vonkajšia teplota vzduchu už pomerne vysoká, rovnako ako aj vlhkosť vzduchu. Avšak na múroch kúrie sa prejavila určitá tepelná zotrvačnosť po zime a preto boli múry podstatne chladnejšie, práve tento jav mohol mať za následok kondenzáciu vodnej pary vo vyšších polohách stien. Tento jav by vysvetľoval nameranie na niektorých miestach objektu, nakoľko iné dôvody neboli preukázané. Následne bol vypracovaný projekt pre odvlhčenie a opravu povrchov. Po realizácii podrezania muriva sa pristúpilo k druhému meraniu. Tretie meranie bolo uskutočnené s dostatočným odstupom, ešte pred samotnou realizáciou omietok. Všetky hodnoty sú zaznamenané v tabuľke 2 a taktiež v grafe číslo 1 a 2.

Tabuľka 2 - Záznamy vybraných meraní vlhkosti

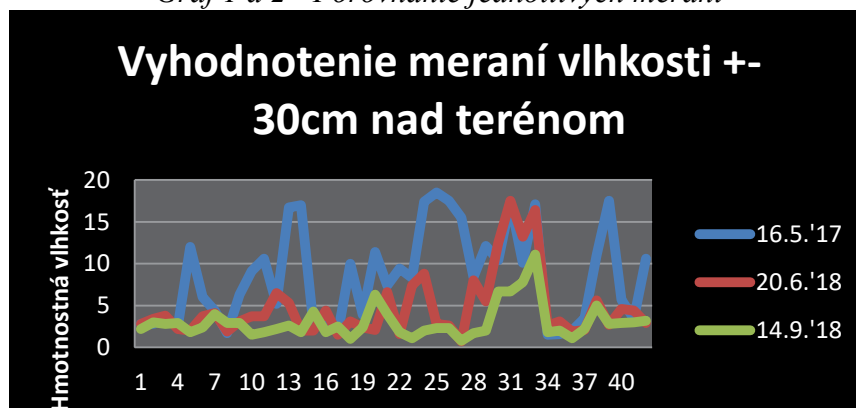
| Miesto merania | Výška merania od podlahy [cm] | Hmotnostná vlhkosť [%] | | | Výška merania od podlahy [cm] | Hmotnostná vlhkosť [%] | | | Poznámka |
|----------------|-------------------------------|------------------------|----------|----------|-------------------------------|------------------------|----------|----------|-----------------|
| | | 16.5.'17 | 20.6.'18 | 14.9.'18 | | 16.5.'17 | 20.6.'18 | 14.9.'18 | |
| M1 | 30 | 2,8 | 2,8 | 2,2 | 100 | 5,1 | 3,6 | 1,7 | Fasáda z terénu |
| M4 | 30 | 2,5 | 2,2 | 2,9 | 100 | 7 | 4,8 | 2 | Fasáda z terénu |
| M5 | 50 | 12 | 2 | 1,8 | 100 | 4,3 | 6,8 | 2,4 | Fasáda z terénu |
| M6 | 30 | 6 | 3,7 | 2,4 | 120 | 7,4 | 6,6 | 4,6 | Omietka |
| M7 | 30 | 4,4 | 4,1 | 4 | 120 | 10,6 | 11,2 | 7,6 | Murivo |
| M9 | 30 | 6,3 | 3,1 | 2,9 | 120 | 11 | 3,3 | 5,2 | Fasáda z terénu |
| M10 | 10 | 9,1 | 3,7 | 1,5 | 180 | 4,4 | 1,4 | 1,9 | Int juh |
| M11 | 10 | 10,6 | 3,7 | 1,8 | 180 | 1,2 | 1,1 | 1,3 | Int juh |
| M12 | 10 | 5,2 | 6,5 | 2,2 | 180 | 2 | 2,3 | 2,2 | Int vých |
| M13 | 10 | 16,7 | 5,3 | 2,6 | 180 | 11,9 | 1,6 | 2 | Int vých |
| M14 | 10 | 17 | 2 | 1,8 | 180 | 10,4 | 1,4 | 1,8 | Vnúť stena |
| M18 | 10 | 10 | 3,1 | 1 | 180 | 8,5 | 3,7 | 2,8 | Vnúť stena |
| M19 | 30 | 3,9 | 2,4 | 2,4 | 160 | 1,1 | 1,5 | 4,5 | Vnúť stena |

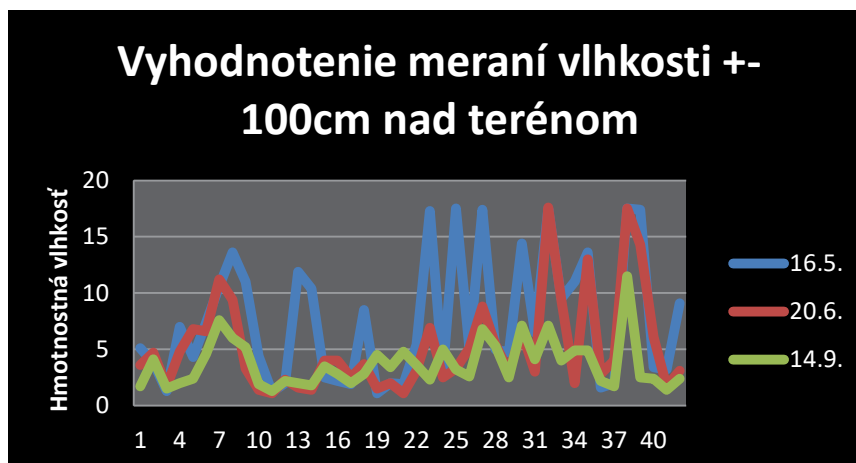
| | | | | | | | | | |
|-----|----|------|------|------|-----|------|------|------|---------------|
| M20 | 30 | 11,4 | 2,1 | 6,3 | 150 | 2 | 2 | 3,4 | Int juh |
| M22 | 30 | 9,4 | 1,6 | 1,8 | 100 | 5,4 | 3,1 | 3,6 | Vnút stena |
| M23 | 30 | 8,3 | 7,4 | 1,1 | 100 | 17,3 | 6,9 | 2,3 | Vnút stena |
| M24 | 30 | 17,4 | 8,8 | 2 | 100 | 2,9 | 2,5 | 5 | Vnút stena |
| M25 | 50 | 18,5 | 2,8 | 2,3 | 100 | 17,5 | 3,3 | 3,2 | Int juh |
| M26 | 30 | 17,5 | 2,6 | 2,3 | 100 | 5,1 | 5,1 | 2,6 | Sonda |
| M27 | 30 | 15,5 | 0,7 | 0,8 | 100 | 17,4 | 8,8 | 6,8 | Int západ |
| M30 | 30 | 10,4 | 12,5 | 6,7 | 100 | 14,4 | 6,5 | 7,1 | Vnút stena |
| M31 | 30 | 17,4 | 17,5 | 6,7 | 100 | 6,5 | 3 | 4,1 | Vnút stena |
| M32 | 30 | 10,1 | 13,2 | 7,8 | 100 | 17,5 | 17,6 | 7,1 | Int západ |
| M33 | 30 | 17,1 | 16,4 | 11,1 | 100 | 9,5 | 9,4 | 4 | Vnút stena |
| M38 | 30 | 11 | 5,6 | 5 | 100 | 17,5 | 17,5 | 11,5 | Int západ |
| M39 | 30 | 17,5 | 2,7 | 2,8 | 100 | 17,4 | 14,3 | 2,5 | Int západ |
| M40 | 30 | 5,7 | 4,6 | 2,9 | 100 | 3,4 | 6,1 | 2,4 | Vnút stena |
| M41 | 30 | 3,4 | 4,4 | 3 | 100 | 3,2 | 1,7 | 1,4 | Fasáda sever |
| M42 | 30 | 10,6 | 2,9 | 3,2 | 100 | 9,1 | 3,1 | 2,4 | Pivnica sever |

Tabuľka 3 - Podmienky pri meraní vlhkosti

| Dátum merania | T _{vzduchu} [°C] | Φ [%] | T _{steny} [°C] |
|---------------|---------------------------|-------|-------------------------|
| 16.5.2017 | 24,4 | 82,3 | 16,4 |
| 20.6.2018 | 29,5 | 46,3 | 21,8 |
| 14.8.2018 | 25,5 | 62,9 | 24,3 |

Graf 1 a 2 - Porovnanie jednotlivých meraní





Záver

Je predpoklad, že výsledky meraní po realizácii dodatočnej izolácie historických konštrukcií preukážu výrazné zníženie zavlhnutia riešených konštrukcií. Nakoľko bude realizovaných viacero meraní a na viacerých budovách, očakáva sa, že kladné výsledky budú mať relevantnú hodnotu práve pre spomínané Krajské pamiatkové úrady a preukážu nutnosť realizácie tejto technológie pri sanácii historických konštrukcií.

Literatúra

[1] Makýš, O.: *Technológia obnovy budov, Ochrana a oprava spodných a obalových konštrukcií*. Bratislava: SPEKTRUM STU 2018, s. 27-80. ISBN 978-80-227-4848-3

[2] Lebeda, J. a kol.: *Sanace zavlhlého zdiva*. Praha: SNTL, 1988.

[3] Witzany, J.: *Konstrukce pozemních staveb. Poruchy a rekonstrukce staveb. 2. díl*. Praha: ČVUT, 1995. ISBN 80-01-01310-3

[4] Balík, M.: *Vysušování zdiva 1*. Praha: Grada Publishing, 1999. ISBN 80-247-0438-2.

[5] Balík, M.: *Vysušování zdiva 2*. Praha: Grada Publishing, 1997.

[6] Balík, M.: *Vysušování zdiva 3*. Praha: Grada Publishing, 1999.

[7] Greško, D. – Adamská, G. – Držka, M.: *Konštrukcie pozemných stavieb. Poruchy a rekonštrukcie stavieb 1*. Bratislava: SvF STU, 1991.

[8] Ashurst, J. – Ashurst, N.: *Practical Building Conservation. Vol. 3. Plasters, Mortars and Renders*. Hants: English Heritage Technical Handbook, Gower Technical Press, 1989.

[9] MAKÝŠ, O. - HRČKA, M. - ŠROBÁROVÁ, D. - ŠŤASTNÝ, P. Effects of technologies focused on fighting moisture. In PLATKO, P. ESaT 2018. Košice: Technical University of Košice Faculty of Civil Engineering, 2018, ISBN 978-80-553-2982-6.

[10] ČSN P 73 0610: *Hydroizolace staveb, Sanace vlhkého zdiva, Základní ustanovení*

GEODESY AND CARTOGRAPHY

Richard Czikhardt¹

Študijný program: Geodézia a kartografia, ročník: 3.

Performance assessment of first GNSS-collocated artificial SAR reflector in Slovakia

Análýza kvality meraní prvého SAR kútového odrážača kolokovaného s GNSS na Slovensku

Abstract

One of the major current challenges of InSAR geodesy is transformation of datum-free networks of persistent scatterers to a standardized terrestrial reference frame via collocation with other space geodetic techniques. Such collocation can only be attained by means of artificial SAR reflectors. We present first GNSS-collocated SAR corner reflector in Slovakia, installed at Partizánske observatory. Design considerations necessary to achieve a geodetic measurement quality are discussed. We assess the reflector's performance with respect to the a-priori simulation on the basis of recent Sentinel-1 measurements. Corner reflector's performance is evaluated as satisfactory with average Radar Cross Section of 30dBm² for all Sentinel-1 tracks, while a-priori estimated standard deviations of phase measurements are less than 1 mm.

1. Introduction

Satellite radar interferometry (InSAR) is inherently a relative geodetic technique requiring one temporal and one spatial reference to obtain the datum-free estimate on the millimetre displacements of the network of persistent scatters (PS). With the current age of the Sentinel-1 satellite mission, monitored PS networks can easily span hundreds of kilometres. One of the major current challenges within InSAR community is thus to tie such networks to a well-defined terrestrial reference frame (TRF) by collocation with other space geodetic techniques realizing TRF – like Global navigation satellite systems (GNSS). Such collocation can only be attained by means of artificial SAR reflectors – either passive corner reflectors or active radar transponders. First section of this work summarizes radiometric and geometric properties of SAR measurements of artificial reflectors in relation to their main design considerations. Second section comprises analysis of first two months of Sentinel-1 measurements from corner reflector installed at Partizánske.

2. Artificial SAR reflectors

Passive corner reflectors – most typically a trihedral, comprising of three orthogonal plates intersecting at corner point (the apex) – reflects incident energy directly towards its source. A major advantage for InSAR geodesy is that position of their effective phase centre is exactly known, which overcomes the otherwise limited SAR geocoding accuracy (e.g. by directly determining position of apex using GNSS). In this work we consider only passive artificial reflectors – the corner reflectors – nowadays in a common use for SAR radiometric and geometric calibration, or densification of scarce InSAR networks of natural radar scatterers. Active radar transponders still represent separate “prototype” group.

¹ Richard Czikhardt, Ing., Katedra geodetických základov, SvF STU v Bratislave, Radlinského 11, 813 68, Bratislava, richard.czikhardt@stuba.sk

2.1 SAR measurements of artificial SAR reflectors

The band limited SAR signal in range and azimuth widens the impulse response of an arbitrary scatterer to a 2D sinc function in spatial domain. Strong point scatterer (i.e. an artificial SAR reflector) is an approximation of ideal radar point scatterer [1]. Complex signal measurement (Single-look-complex, SLC data sample) over peak P of its impulse response holds:

$$y = A_p \exp(j\psi_p) = \sum_{res,p} A_i \exp(j\psi_i), \quad (1)$$

where measured complex phasor is result of sum (superimposition) of dominant point scatterer and remaining scattering contributions of its surroundings – a clutter – within resolution cell res (e.g. for Sentinel-1 this represents 4 m in range times 22 m in azimuth on the ground). This is a consequence of inherent nature of coherent SAR scattering [2]. Phase measurement ψ in equation (1) is related to distance between scattering phase centre and satellite's antenna phase centre and it is of primary interest for InSAR applications. Magnitude of the complex signal – peak amplitude A – represents the response power of a scatterer. Amplitude of a point scatterer follows Rice probability distribution [3, 4], while amplitude of distributed scatterers (the clutter) is Rayleigh distributed [5].

Amplitude measurement is lacking the physical context and needs to be radiometrically calibrated into a standardized and comparable quantity, independent of the transmitted energy and sensor-target distance. Radiometric calibration is usually performed via simple conversion into radar reflectivity [6]:

$$\beta_0 = \frac{A^2}{cal_\beta^2} [-], \quad (2)$$

where calibration factor cal_β^2 is generally annotated in look-up table metadata of SLC products. The most commonly used radiometric measurement quantity in radar systems theory is the Radar Cross Section (RCS). RCS describes the amount of incident energy intercepted by the target and reflected in the direction of the radar receiver [7]. In other words, it can be seen as a ratio between energy reflected from a target to the energy reflected from the ideal sphere with cross-sectional area of 1 m². Hence the RCS has units of area. It's the characteristic of the particular target and the measure of its equivalent cross-sectional area as seen by the radar (transmitter) operating at particular wavelength. Because its value can extend over an enormous range (from 0.01 m² for clutter like grass to more than 100 m² for large metallic objects), it is often expressed in logarithmic (dB) scale. Having observed β_0 , apparent RCS can be approximately computed as [8]:

$$RCS \approx 10 \log_{10}(\beta_0 \cdot \Delta_{res}) [dBm^2], \quad (3)$$

where Δ_{res} is sensor's resolution area computed as slant-range times azimuth resolution.

Most importantly for InSAR applications, standard deviation of phase measurement of particular point scatterer is proportional to its Signal-to-clutter ratio (SCR) as follows [9]:

$$\sigma_\psi^{a-priori} \approx \frac{1}{\sqrt{2SCR}} [rad]. \quad (4)$$

SCR of an artificial reflector with RCS_{AR} can be computed as:

$$SCR = \frac{RCS_{AR}}{\beta_0^{clutter} \Delta_{res}} \quad [-], \quad (5)$$

where $\beta_0^{clutter}$ is reflectivity of a clutter times resolution area – i.e. equivalent RCS power of clutter occupying the same resolution cell as reflector. Hence two primary variables guide the installation of reflectors: its design RCS and clutter present at the deployment site.

2.2 Simulation of reflector’s RCS and design considerations

RCS of a corner reflector depends on its geometry (shape, size and orientation w.r.t. sensor), material and sensor’s wavelength. Using simplified relations from geometrical optics, which employ following presumptions [10]:

- inner leg-length dimension a of a reflector is large with respect to a wavelength λ ,
- no implicit information on the reflector’s material is incorporated in relations, only the presumption that it is homogeneous (e.g. aluminium),
- reflector is in a “free-space”, absent of influence from surrounding objects, most notably the ground itself.

RCS of a corner reflector can be then simulated analytically as [10, 11]:

$$RCS = \frac{4\pi}{\lambda^2} \Delta_{eq}^2 \quad [m^2], \quad (6)$$

where Δ_{eq} is the equivalent flat plate area of the reflector perpendicular to signal, which can be computed on the basis of reflector’s shape and orientation w.r.t. signal. Most common shapes of reflectors are trihedrals (figure 1). For instance, square trihedral (ST) shape of reflector gives [10]:

$$RCS_{ST} = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2} \quad [m^2]. \quad (7)$$

However, the equation (7) only holds for peak RCS observable in the bore-sight direction of the reflector. Bore-sight of a trihedral is in a direction that makes grazing angle of $\theta_0 = \tan^{-1}(1/\sqrt{2}) \approx 35.26^\circ$ with any of the side-plates (figure 1).

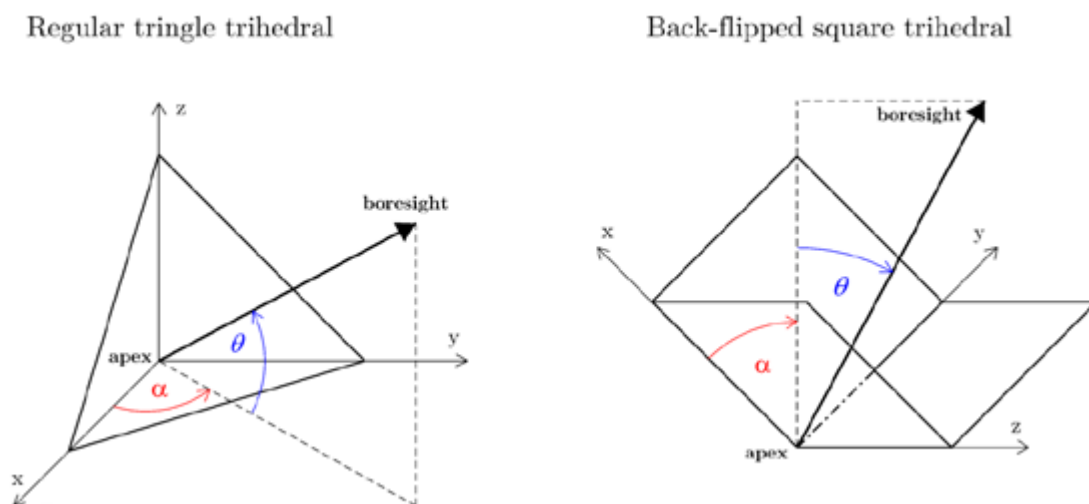


Figure 1: Geometry of trihedral corner reflectors

More generally, RCS can be expressed as function of orientation:

$$RCS_{ST}(\alpha, \theta) = \begin{cases} \frac{4\pi}{\lambda^2} a^4 \left(\frac{4c_1c_2}{c_3}\right)^2 & \text{for } c_2 < \frac{c_3}{2} \\ \frac{4\pi}{\lambda^2} a^4 \left(c_1 \left(4 - \frac{c_3}{c_1}\right)\right)^2 & \text{for } c_2 \geq \frac{c_3}{2} \end{cases} \quad [m^2], \quad (8)$$

where c_1, c_2, c_3 are directional cosines realizing the projection into equivalent area:

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} = \begin{cases} \sin \theta \\ \cos \theta \sin \alpha \\ \cos \theta \cos \alpha \end{cases} \quad \text{such that } c_1 \leq c_2 \leq c_3 . \quad (9)$$

RCS diminishes away off the bore-sight directions, i.e. its aspect dependant and varies with azimuth and elevation angle. Attenuation – i.e. the actual RCS loss due to misalignment – simulated for triangular and square trihedral is shown by figure 2.

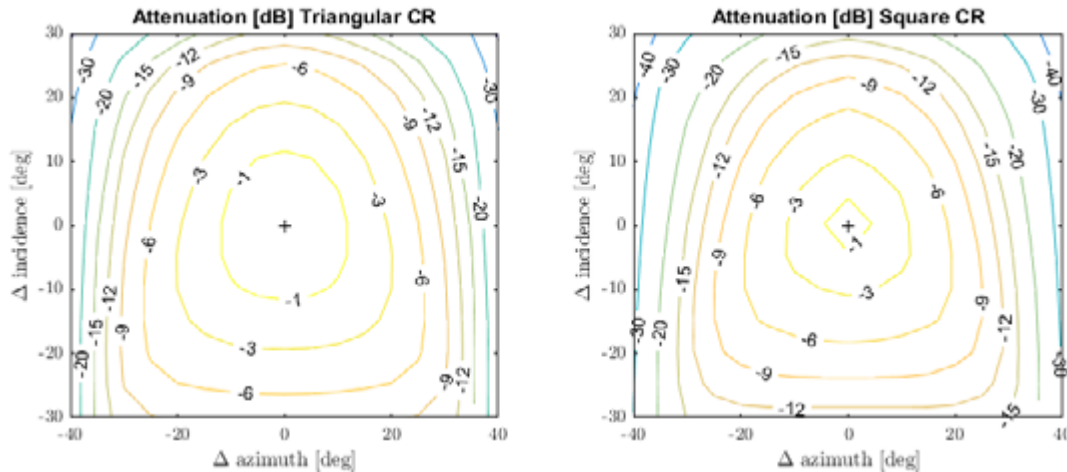


Figure 2: Attenuation – equivalent RCS loss off-boresight (azimuth and incidence dependent) of triangular and square trihedral reflectors

Simulation in figure 2 emphasizes the importance of correct orientation of reflector’s bore-sight towards the satellite’s line-of-sight (LOS) in order to utilize the maximum power response of a deployed reflector.

As apparent from equation (8), the major design parameter of a reflector is its inner leg-length a . Relation between various inner leg-lengths and resulting RCS simulated for triangle and square trihedrals is shown in figure 3. The leg-length choice for a reflector design should be a compromise between sufficient RCS and robustness of a construction itself – while too large plates can lead to susceptibility to outer conditions such as wind, negatively influencing the stability of a reflector.

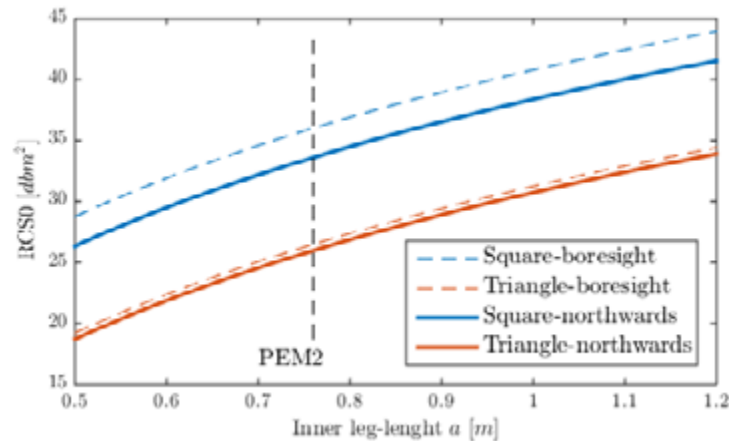


Figure 3: Simulated RCS of trihedral reflectors in bore-sight and misaligned northwards

Using back-flipped reflector (figure 1b) has an advantage of closer alignment of bore-sight (grazing elevation angle $\theta_0 = 35.26^\circ$) with common local incidence angles of SAR satellites (e.g. $\theta \in (30^\circ; 45^\circ)$ for Sentinel-1 satellites), thus eliminating the need to tilt the reflector in any manner.

It is convenient to consider the double-reflector construction (illustrated by figure 4), suitable for both ascending and descending satellite orbits, while having the same phase centre for both. However, northward orientation of reflector to attain the double-orbit functionality causes loss of RCS (figure 2). In order to afford the loss of RCS due to off-bore-sight orientation, square trihedral is a more robust choice (figure 3). Moreover, actual loss of RCS due to azimuthal misalignment has an advantage, as incidence angle difference of overlapping Sentinel-1 tracks (at around $\Delta\theta = \pm 10^\circ$) causes minimum additional RCS variation (figure 2b).

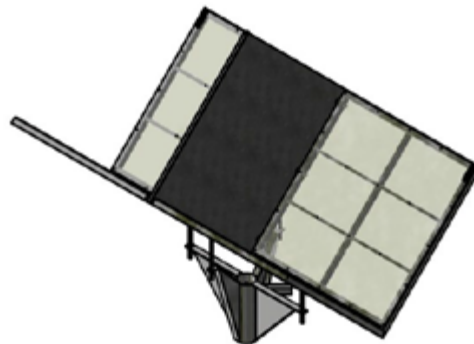


Figure 4: Model of double-orbit back-flipped square trihedral (DBST) corner reflector with perforated side-plates

Drawback of such level back-flipped reflector (figure 4) is its proneness to accumulation of precipitation or debris. The design model DBST used within this work aims to overcome this issue by use of perforated side-plates. Hence the objective of its performance testing should also quantify the influence of perforation on RCS, not yet discussed in current literature.

3. Deployment and performance of corner reflector at Partizánske observatory

First SAR corner reflector for collocation purposes in Slovakia was installed at Partizánske observatory, in a close proximity of permanent GNSS station PEMB (figure 5), being part of a

SKPOS network. Installation was accomplished under young researcher support project OPERAS-1 (Operational exploitation of Sentinel-1 satellite mission in Slovakia) and under cooperation with Slovak Geodetic Institute (GKU). It's a double back-flipped square trihedral (DBST) model for both C-band Sentinel-1 orbits. Its skeleton is made from stainless steel, while reflecting plates are made from 3 mm thick aluminium. Bottom side-plates are perforated. Reflector was mounted on a 2.5 Zoll steel rod set into a cubic concrete foundation with 1 m edge. Northward orientation of its central plate was accomplished via GNSS staked-out points. Trimble Zephyr 3 Geodetic antenna is mounted on a tip of central reflector plate in order to precisely determine the TRF coordinates of reflector's phase centre (apex) and its local ties w.r.t. permanent station PEMB. As of 20.8.2019 it has obtained the IERS DOMES number PEM2 (11534M002).

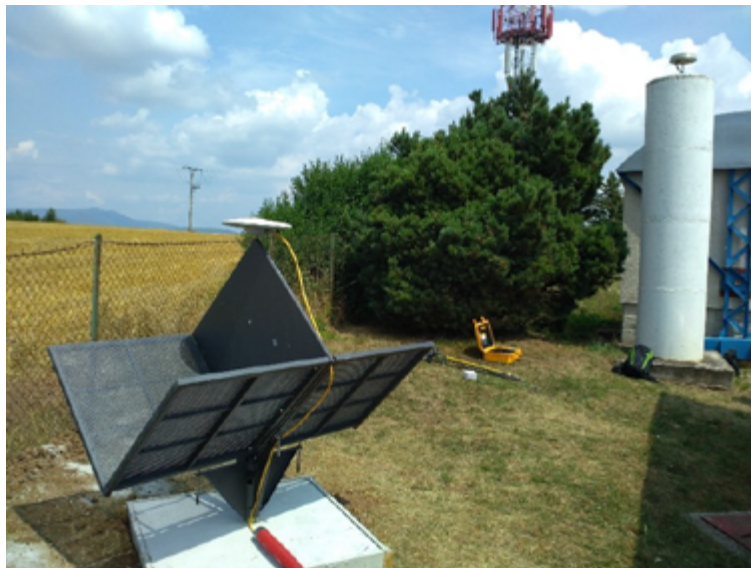


Figure 5: Double back-flipped square trihedral C-band SAR corner reflector (DBST) installed at permanent GNSS station PEMB (Partizanske observatory), SKPOS network. Picture taken during installation date: 31.7.2019

Following the theory introduced in section 2, RCS analysis was performed by procedure thoroughly described by author's article in preparation [13]. Sentinel-1 SLC observations from two ascending (073 & 175) and two descending (051 & 124) tracks spanning last two months plus one month prior to reflector deployment were utilized in the analysis.

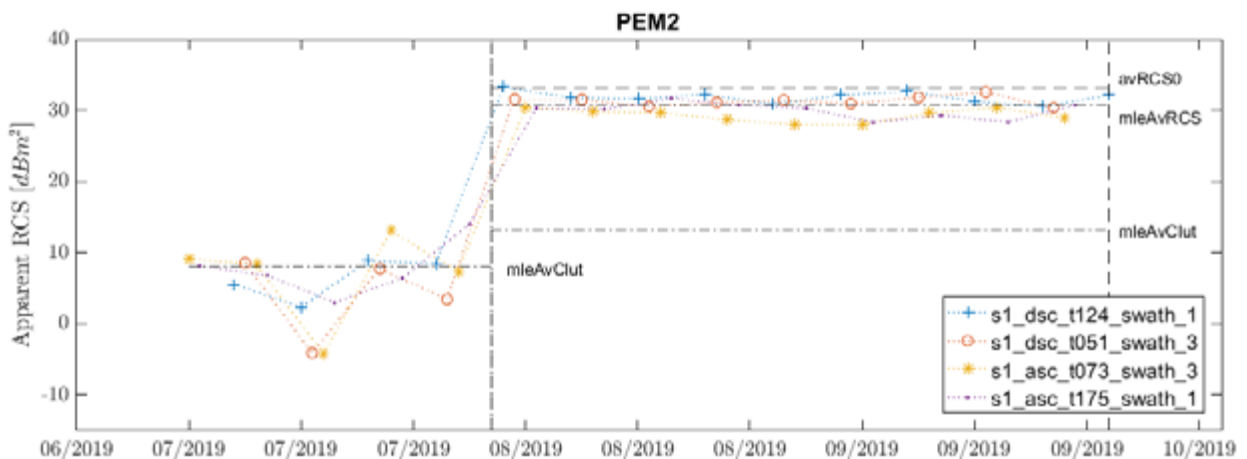


Figure 6: Apparent RCS time series of PEM2 DBST reflector

Apparent RCS time-series for DBST reflector PEM2 are displayed in figure 6. RCS of reflector is estimated by means of maximum likelihood fit of Rice distribution (*mleAvRCS*) to samples after reflector installation (demarcated by dashed vertical line). Corresponding theoretical RCS (*avRCS0*) is simulated in accordance to section 2, equation (9). Amplitude samples of the site before reflector deployment are used as empirical data to fit a Rayleigh distribution to and thus estimate the power of the clutter (*mleAvClut* in figure 6). Clutter power is also estimated for samples after reflector deployment. Average values over all tracks are displayed for clarity. Table 1 summarizes RCS values estimated per-track.

Table 1: Simulated vs. observed (estimated) RCS of reflector installed at Partizánske observatory

| PEM2 (Double back-flipped square trihedral) | | | | | |
|---|---------------|-------------|-----------------------------|-------------------------------------|--|
| Sentinel-1 track | Incidence [°] | Azimuth [°] | RCS_0 [dBm ²] | \widehat{RCS} [dBm ²] | $\hat{\sigma}_{RCS}$ [dBm ²] |
| ASC073 | 44.6 | -98.99 | 32.58 | 29.26 | 0.89 |
| ASC175 | 35.9 | -100.53 | 33.62 | 29.96 | 1.12 |
| DSC051 | 43.1 | 99.26 | 32.95 | 31.32 | 0.67 |
| DSC124 | 34.2 | 100.81 | 33.50 | 31.85 | 0.82 |

On the basis of RCS estimates in table 1, following observations and conclusions are raised:

- For all tracks we observe roughly 2dB lower apparent RCS as compared to theoretical one. This could be due to perforation of bottom side-plates which is not taken into account within simulation. However, such simulation is not discussed in current literature for C-band, only for X-band observations [12]. It has only been noted that expected loss should be approximately 1-2dB, confirming our estimates.
- Roughly 1.5dB difference is observed between ASC/DSC tracks, while the actual difference should be around 0.2-0.5dB under proper simulation conditions. This could be due to incorrect northward orientation of middle-plate of reflector, or non-ideally perpendicular construction, which remains to be verified in-situ.
- 5dB power increase in apparent clutter strength is estimated after reflector deployment. This could be due to a concrete foundation of the reflector.
- Considering the standard deviations of estimated RCS, the clutter sample before installation as well as after it should be increased for more reliable estimate.
- Nonetheless, employing RCS estimates of reflector and clutter yields initial estimates on the SCR and thus expected phase measurement quality (table 2) in accordance to equation (4) and (5).

Table 2: Estimated SCR performance of reflector installed at Partizánske observatory

| PEM2 (Double back-flipped square trihedral) – SCR performance | | | | | |
|---|-------------------------------------|--|---|----------------------|--------------------------|
| Sentinel-1 track | \widehat{RCS} [dBm ²] | $RCS_{clutter,before}$ [dBm ²] | $RCS_{clutter,after}$ [dBm ²] | \widehat{SCR} [dB] | $\hat{\sigma}_\psi$ [mm] |
| ASC073 | 29.26 | 9.1 | 11.9 | 17.3 | 0.9 |
| ASC175 | 29.96 | 9.3 | 14.7 | 15.3 | 1.1 |
| DSC051 | 31.3 | 5.9 | 11.7 | 19.6 | 0.7 |
| DSC124 | 31.9 | 7.0 | 13.9 | 17.9 | 0.8 |

Considering the estimates in table 2, reflector's performance can be preliminary deemed satisfactory. Further work shall confirm the phase measurement stability of the reflector with regard to a-priori

estimated phase standard deviation corresponding to SCR. Processing of the Sentinel-1 measurements over PEM2 reflector has been made fully operational and autonomous. Additional tests should be performed on the eventual GNSS multipath impact caused by the reflector.

References

- [1] PERISSIN, D.: *SAR Super-resolution and Characterization of Urban Targets*. Saarbrücken, Deutschland: VDM Verlag Dr Mueller, 2010. 144 p. ISBN 3639294173.
- [2] HANSSSEN, R. F.: *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*. The Netherlands: Kluwer Academic publishers, 2001. ISBN 90-73235-43-X.
- [3] OLIVER, C. and QUEGAN, S.: *Understanding synthetic aperture radar images*. Raleigh, NC, USA: SciTech Publ, 2004. 512 p. ISBN 1891121316.
- [4] FERRETTI, A., PRATI, C., ROCCA, F.: Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2001, 39(1), 8–20. DOI: 10.1109/36.898661. ISSN 0196-2892.
- [5] BAMLER, R. and HARTL, P.: Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*. 1998, 14(4), R1-R54. DOI: 10.1088/0266-5611/14/4/001. ISSN 0266-5611.
- [6] MIRANDA, N. and MEADOWS, P. J.: *Radiometric calibration of S-1 level-1 products generated by the S-1 IPF. Technical report*. Noordwijk, The Netherlands: European Space Agency, 2015.
- [7] SKOLNIK, M.: *Introduction to Radar Systems, Electrical engineering series*. New York, USA: McGraw-Hill, 2001. 784 p. ISBN 0072881380
- [8] MAREL, H, van LEIJEN, F., and HANSSSEN, R.: First analysis of C-band ECR transponders for InSAR geodesy, in: *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Valencia, Spain, 2018. p. 1399-1402. ISBN 978-1-5386-7151-1.
- [9] KETELAAR, G., MARINKOVIC, P., and HANSSSEN, R.: Validation of Point Scatterer Phase Statistics in Multi-Pass InSAR, in: *Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium (ESA SP-572)*, Salzburg, Austria, 2004. ISBN 92-9092-883-2
- [10] DOERRY, A. W.: *Reflectors for SAR performance testing, Technical report*. Albuquerque, New Mexico, USA: Sandia National Laboratories, 2008.
- [11] GROOT, J.: Letter: Cross section computation of trihedral corner reflectors with the geometrical optics approximation. *European Transactions on Telecommunications*. 1992, 3(6), 637–642. DOI: 10.1002/ett.4460030618. ISSN 2161-3915.
- [12] JAUVIN, M. et al: Integration of Corner Reflectors for the Monitoring of Mountain Glacier Areas with Sentinel-1 Time Series. *Remote Sensing* 2019, 11, 988. DOI: 10.3390/rs11080988. ISSN 2072-4292.
- [13] CZIKHARDT, R, MAREL, H, van LEIJEN, F., and HANSSSEN, R.: SAR measurements in a network of Integrated Geodetic Reference Stations. *In preparation*.

Richard Hontí¹

Geodézia a kartografia, 3. ročník

SEGMENTÁCIA VYBRANÝCH GEOMETRICKÝCH ÚTVAROV Z MRAČIEN BODOV

GEOMETRIC SHAPE SEGMENTATION OF POINT CLOUDS

Abstract

Today, point clouds are becoming an increasingly common initial digital representation of real-world objects. Segmentation is one of the basic steps in point cloud processing, since most of the manufactured objects are composed of basic primitives like planes, cylinders, spheres etc. The paper brings a review of the most reliable methods of geometric shape extraction from point clouds. Within the work on the dissertation thesis of the author two effective algorithms were designed and developed. The first one is dealing with plane segmentation from point clouds. The algorithm developed is a combination of elements of modified RANSAC algorithm and region-based segmentation methods. The second one is developed for automated cylinder segmentation from point cloud data. The algorithm designed can be assigned between model-based segmentation methods and it uses some of the features of the Hough transform.

Kľúčové slová

Mračno bodov, segmentácia, geometrické útvary, roviny, valcové plochy.

1. Úvod

Mračno bodov (z angl. Point Cloud) je možné definovať ako množinu bodov, ktoré ležia na povrchu meraného objektu rozložených v rasti s pravidelným uhlovým rozstupom vo vodorovnom a zvislom smere. Mračno bodov do vysokej miery podrobne dokumentuje meraný objekt a slúži aj ako geometrický podklad pre rôzne úlohy v rozmanitých oblastiach (napr. stavebníctvo, architektúra, strojárstvo, archeológia a iné). Môžeme ho považovať za virtuálny model meraného objektu v bodovej reprezentácii. Najčastejším výsledkom spracovania mračien bodov sú priestorové modely skenovaných objektov. Mračno bodov vo väčšine prípadov sa spracováva po častiach, výsledný 3D model sa potom skladá z niekoľkých menších modelov. V tomto prípade dôležitým krokom spracovania je selektovanie (segmentácia) častí (podmnožín bodov), ktoré prislúchajú daným častiam mračna bodov (napr. určitým konštrukčným prvkom, ako sú steny, potrubia a pod.). Pri segmentácii ide o delenie mračna do niekoľkých homogénnych podmnožín bodov na základe vopred definovaných kritérií.

Predkladaný článok je venovaný problematike segmentácie geometrických útvarov z mračien bodov. V prvej kapitole príspevku je uvedený popis vybraných metód a prístupov na segmentáciu mračien bodov. V ďalšej časti je popísaný efektívny algoritmus navrhnutý na čiastočnú automatizáciu segmentácie rovín z mračien bodov. Ďalej je uvedený popis robustného algoritmu pre automatizovanú segmentáciu valcov. Pre zefektívnenie a jednoduché vykonanie uvedených algoritmov boli vyhotovené samostatné aplikácie pomocou softvéru Matlab[®], popis jednotlivých aplikácií je tiež uvedený.

¹ Ing. Richard Hontí, Katedra geodézie, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, tel. č.: +421 2 59274 396, email: richard.honti@stuba.sk

2. Segmentácia mračien bodov

Segmentácia predstavuje často prvý krok získavania informácií z mračien bodov. Najčastejším prípadom segmentácie je zoskupenie bodov, ktoré ležia na povrchu rovnakého geometrického útvaru (napr. rovina, valec, sféra, a pod.). Segmentácia v tomto prípade môže byť ekvivalentom identifikácie základných geometrických primitív v mračne bodov.

Metódy a prístupy na segmentáciu mračien bodov vo všeobecnosti môžeme rozdeliť do 5 skupín [1], [2], [3]:

- **metódy hrán** (z angl. *Edge-based methods*);

Tieto metódy sú založené na identifikácii hrán ohraničujúcich jednotlivé oblasti v mračne bodov a následnej segmentácii týchto oblastí (resp. geometrických útvarov). Metódy ktoré spadajú medzi metódy na detekciu hrán nám poskytujú možnosť rýchleho segmentovania mračna bodov, ale zároveň sú veľmi citlivé na šum a na nerovnomernú hustotu mračna, čo je ale častým prípadom.

- **metódy povrchov** (z angl. *Region-based methods – region growing*);

Metódy povrchov pri zoskupovaní bodov do jednotlivých segmentov využívajú lokálne charakteristiky povrchov, ako sú napr. orientácia povrchu (normály), krivosť (resp. hladkosť) povrchu a pod. Susedné body, ktoré majú tieto charakteristiky rovnaké (s určitou toleranciou) sú spájané do spoločných segmentov. Jednou zo základných a najviac využívaných algoritmov patriacich do tejto skupiny je *algoritmus postupného zväčšovania povrchu* (z angl. *Surface growing*) [4]. Metódy povrchov vo všeobecnosti sú menej citlivé na šum v mračne bodov ako metódy hrán. Okrem toho sú pomerne jednoduché a sú použiteľné aj v prípade veľkých komplexných mračien bodov, čo je ich výhodou. Na druhej strane výsledky získané týmito metódami sú citlivé na voľbu počiatočného bodu, lokálnych charakteristík povrchov ako aj na voľbu prahových hodnôt (resp. iných kritérií).

- **metódy modelov** (z angl. *Model-based methods – model fitting*);

Metódy modelov na zoskupovanie bodov (segmentáciu) používajú geometrické útvary, ako sú napríklad rovina, valec, sféra, a pod. Body mračna, ktoré prislúchajú k rovnakému geometrickému primitívu (majú rovnakú matematickú reprezentáciu) sú zoskupené do jedného segmentu. Najrozšírenejšími algoritmi sú Houghova transformácia [5] a RANSAC (z angl. *RANdom SAMple Consensus*) [6].

Algoritmus RANSAC je často používaný na odhad parametrov matematického modelu geometrického tvaru z mračna bodov pri minimálnom možnom počte náhodne vybraných bodov. Podľa [7] pre odhad roviny sú potrebné 3 body mračna ak nie sú k dispozícii informácie o ich normálových vektoroch. Pre odhad valcovej plochy a aj sféry sú postačujúce 2 body mračna spolu s ich normálovými vektormi počítané pomocou malých rovinných plôch v okolí týchto bodov z k najbližších susedov, avšak je potrebná voľba viacerých prahových hodnôt, ktoré sú závislé od daného modelu. Optimálna voľba takýchto parametrov môže byť problematická, hlavne pri príliš zašumenom mračne bodov. Výsledok je závislý od náhodnej voľby počiatočného bodu, a v najhoršom prípade sa môže stať to, že RANSAC zlyhá a nenájde sa ani jeden geometrický útvar.

Houghova transformácia sa najčastejšie používa pri detekcii jednoduchých geometrických útvarov, ako sú priamky, kružnice, roviny ale aj pri detekcii valcov. Pri použití Houghovej transformácie pre odhad všetkých k parametrov daného geometrického tvaru, dochádza k k dimenzionálneho priestoru parametrov (v prípade valcovej plochy k 5D), čo je časovo aj výpočtovo veľmi náročná úloha. Z uvedeného dôvodu odhad parametrov sa väčšinou rozdeľuje do dvoch hlavných krokov. V prípade valca (*Obr. 6*) v prvom kroku sa odhadne smer osi valca, následne bod na tejto osi a polomer valca. Metódy modelov umožňujú robustný odhad parametrov matematických modelov geometrických útvarov z mračien bodov aj v prípade, že mračno je výrazne zašumené, a obsahuje veľa odľahlých bodov (z angl. *outliers*). V prípadoch rozsiahlych komplexných mračien bodov je proces segmentácie časovo a výpočtovo náročný.

- **metódy zhlukovania** (z angl. *Clustering (resp. Attributes) based methods*);

Zoskupujú body na základe ich geometrickej alebo rádiometrickej charakteristiky (napr. poloha bodu, normála povrchu, intenzita meracieho signálu), alebo na základe rozmiestnenia v priestore (napr. vzdialenosť bodu od ťažiska klastra).

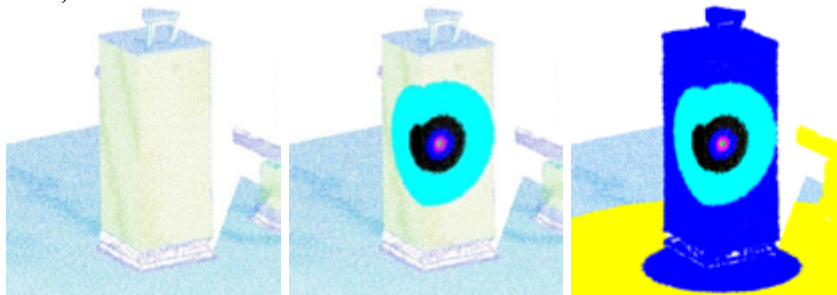
- **metódy grafov** (z angl. *Graph-based methods*);

Metódy grafov na segmentáciu mračien bodov používajú algoritmy založené na teórii grafov. Body mračna tvoria vrcholy jednotlivých grafov a hrany spájajú susedné body mračna na základe určitých kritérií. Tieto metódy sú pomerne efektívne a presné, v dôsledku čoho sú veľmi populárne najmä v robotike.

3. Navrhnutý algoritmus na segmentáciu rovín z mračien bodov

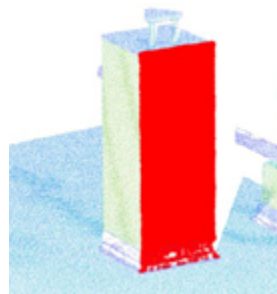
Algoritmus na segmentáciu rovín z mračien bodov je kombináciou prvkov modifikovaného RANSAC algoritmu a metódy povrchov. Priebeh algoritmu je nasledovný:

- Na začiatku algoritmu je potrebné si zvoliť počiatočný bod roviny. Následne prvotný odhad parametrov roviny je vykonaný z 10 najbližších susedov pomocou ortogonálnej regresie minimalizujúcej kolmé vzdialenosti bodov aproximovanej časti mračna od regresnej roviny v priestore.
- Odhadnutý model je následne testovaný voči vybraným k najbližším susedom, pričom sú identifikované body v ktorých vzdialenosť od roviny je menšia ako definovaná prahová hodnota (t. j. body, ktoré ležia na povrchu odhadnutej roviny pri aktuálne zvolenej prahovej hodnote).
- Parametre roviny sú znova odhadnuté použitím všetkých identifikovaných (resp. vyhovujúcich) bodov.
- Výpočet prebieha iteračne pri postupnom zväčšovaní počtu k najbližších bodov v jednotlivých iteráciách (*Obr. 1*).



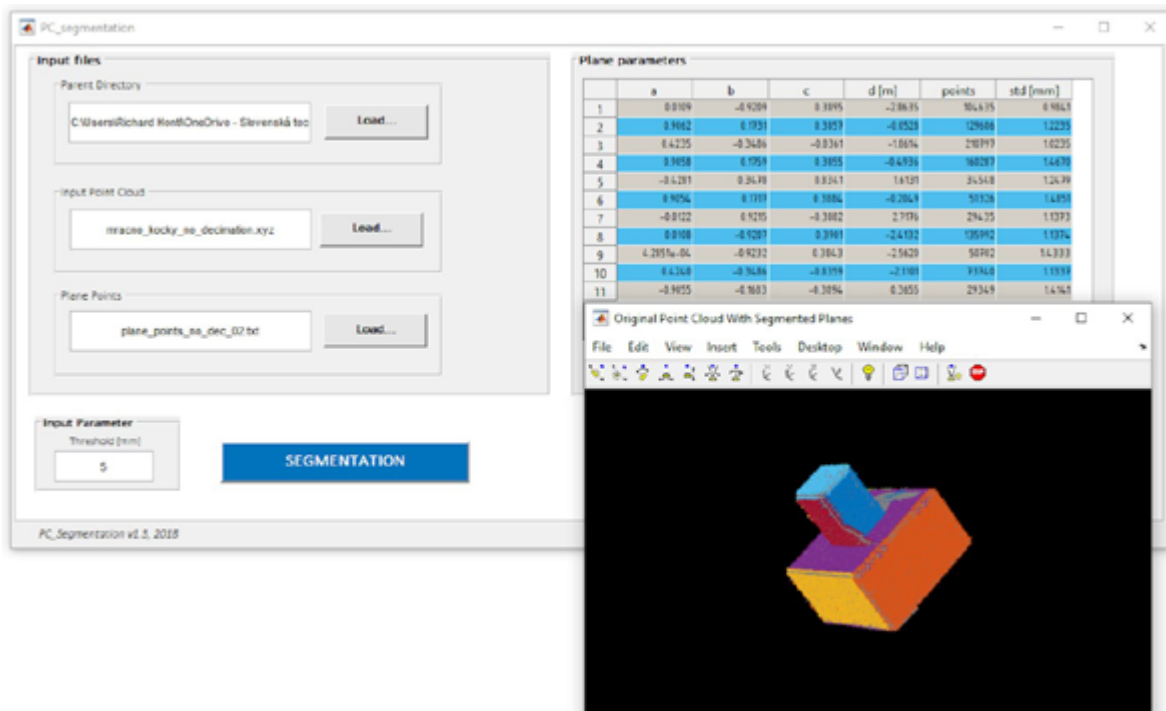
Obr. 1 Iteračné zväčšovanie k najbližších bodov

- Iteračné testovanie najbližších bodov a odhad parametrov roviny je ukončený (*Obr. 2*), ak počet bodov, aproximovaných odhadnutým modelom, je väčší ako definovaná hodnota, alebo parametre odhadnutého modelu (roviny) sa nezmenia signifikantne medzi poslednými dvomi iteráciami.



Obr. 2 Odhadnutá rovina pomocou uvedeného algoritmu

Pre čiastočnú automatizáciu procesu segmentácie bola vytvorená samostatná aplikácia PC_Segmentation v softvéri MATLAB®. Dialógové okno aplikácie po vykonaní segmentácie je zobrazené na Obr. 3.



Obr. 3 Dialógové okno aplikácie PC_Segmentation

Na Obr. 4 sú zobrazené detaily segmentovania, vľavo sú zobrazené jednotlivé roviny skrinky (časť mračna bodov geodetického laboratória). Mračno skrinky je tvorené cca 25 500 bodmi a skladá sa zo 6-ich rovín. Segmentácia bola vykonaná s 5 milimetrovou prahovou hodnotou. Štandardná odchýlka vypočítaná na základe ortogonálnych vzdialeností bodov od odhadnutej roviny bola v každom prípade menšia ako 1,2 mm. Výsledkom segmentácie mračna bodov skrinky bolo 6 rovín s celkovým počtom bodov 23 385, čo znamená, že do segmentačného procesu nebolo zahrnutých 2 115 bodov (body, ktoré nie sú súčasťou charakteristických rovín skrinky, ako napr. úchytky skrinky a pod.). Vynechané body predstavujú iba 8,29 % z celkového počtu bodov.

Okrem toho na obrázku v strede sú zobrazené jednotlivé roviny piliera a vpravo segmentované roviny kocky.



Obr. 4 Detaily segmentovania pomocou aplikácie PC_Segmentation

4. Navrhnutý algoritmus na segmentáciu valcov z mračien bodov

Existuje viacero prístupov a metód na segmentáciu valcov z mračien bodov. Tieto prístupy vo všeobecnosti môžeme deliť na prístupy, ktoré vyžadujú predspracovanie (predsegmentáciu) mračna bodov (aby mračno bodov neobsahovalo odľahlé merania); a do druhej skupiny patria metódy, ktoré pracujú s pôvodným mračnom bodov, bez potreby výrazného pred spracovania (napr. RANSAC, Houghova transformácia a pod.) [8]. Pre automatizáciu procesov segmentácie sú vhodnejšie metódy spadajúce do druhej skupiny. Okrem toho vo väčšine aplikácií sa jednotlivé prístupy kombinujú.

Algoritmus navrhnutý na automatizovanú segmentáciu valcov z mračien bodov je možné zaradiť medzi metódy modelov a využíva prvky Houghovej transformácie. Pseudokód navrhnutého algoritmu je znázornený na Obr. 5.

➤ **Vstup:** mračno bodov; polomer valca r , prahová hodnota pre polomer t_r , prahová hodnota t_d pre vzdialenostné kritérium, t_n pre normálové kritérium; počet valcov $ncyl$.

```

it = 25; - počet iterácií
for ii = 1 : ncyl
| 1. výpočet normálových vektorov v každom bode mračna
| 2. náhodná voľba počiatočného bodu
| index_it = 0;
|   || 3. for index_it = 1 : it
|       || 4. odhad parametrov valcovej plochy pomocou k-najbližších susedov (k=15).
|       ||   -> Odhad orientácie osí valcovej plochy  $\vec{o}$  pomocou singulárneho rozkladu matice.
|       ||   -> Premietnutie vybraných bodov do roviny s normálovým vektorom  $\vec{o}$ .
|       ||   -> Fitovanie kružnice okolo bodov a určenie súradníc stredu  $p^o$  a polomeru  $r$  kružnice.
|       || 5. Testovanie ostatných bodov, či ležia v odhadnutej valcovej ploche.
|       ||   -> aktualizácia množiny vyhovujúcich bodov na základe kritérií pre vzdialenosť
|       ||       a normálový vektor.
|       || 6. index_it = index_it + 1.
|   ||end
|   || 7. if index_it == it
|       || 8. Validácia pomocou výpočtu konvergencie & filtrovanie na základe polomerov.
|       || 9. if konverg <  $\epsilon$  && num_inl > 50
|           || || Validácia úspešná – Segmentácia valca vykonaná
|       ||end
|   ||end
end

```

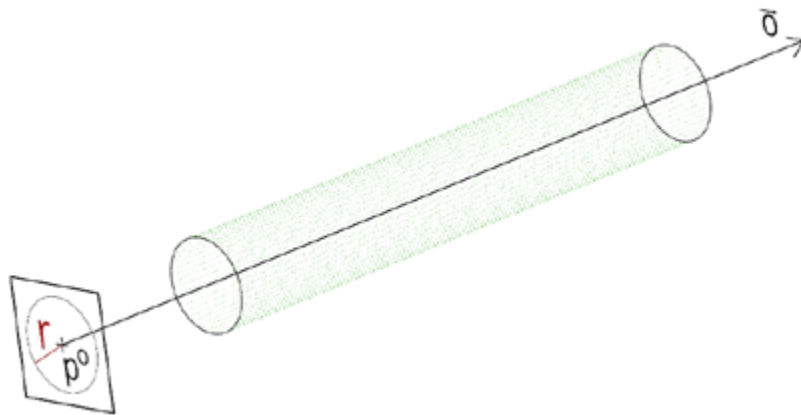
➤ **Výsledok:** parametre jednotlivých valcov (p^o, \vec{o}, r); segmentované mračná jednotlivých valcov.

Obr. 5 Pseudokód navrhnutého algoritmu na automatizovanú segmentáciu valcov z mračien bodov

Vstupom do algoritmu sú: mračno bodov; prahové hodnoty pre testovanie, resp. výber vyhovujúcich bodov (α pre vzdialenostné kritérium a β pre normálové kritérium); predpokladaný polomer valca r , prahová hodnota pre polomer valca tr ; a počet valcov $ncyl$.

Prvým krokom algoritmu je výpočet normálových vektorov vo všetkých bodoch mračna použitím malých lokálnych rovinných plôch z priestorových súradníc daného bodu a k -najbližších bodov. Odhad roviny sa vykonáva pomocou ortogonálnej regresie.

Následne sa vykoná náhodný výber počiatočného bodu pre odhad valca. Prvý odhad parametrov valcovej plochy (Obr. 6) je vykonaný z 15 najbližších susedov nasledovne:



Obr. 6 Parametre valcovej plochy

- V prvom kroku sa odhadne smer osi valca \vec{o} , t. j. určí sa vektor, ktorý je kolmý na normálové vektory v týchto 15 bodoch mračna. Pre tento účel je použitý singulárny rozklad matice normálových vektorov \mathbf{C} (1):

$$\mathbf{C} = \sum_{i=1}^n n_i^T \cdot n_i \quad (1)$$

kde n_i sú normálové vektory v jednotlivých bodoch mračna.

- Druhým krokom je premietnutie vyhovujúcich bodov do roviny v smere osi valca do roviny kolmej na os valca v ktorej tak vytvárajú kružnicu (Obr. 6).
- V treťom kroku sa vykoná odhad parametrov kružnice (súradnice stredu a polomer kružnice) pomocou algebraickej regresie, ktorá minimalizuje riešenie sústavy rovníc algebraických funkcií definujúcich valec (minimalizuje súčet štvorcov „algebraických vzdialeností“). Algebraická regresia je podrobne rozpísaná v [9]. Parametre kružnice (stred a polomer kružnice) sú zároveň aj parametrami valca (bod na osi valca p^0 , polomer valca r).

Uvedené kroky odhadu sú aplikované iteračne pre vyhovujúce body. Pri každej iterácii je aktualizovaná množina vyhovujúcich bodov na základe testovania, ktoré sa vykonáva pomocou 2 kritérií, matematicky formulovaných nasledovne:

$$\left(|\Delta vzd_i| < \frac{r}{t_d} \right) \& \left(|\Delta norm_i| < t_n \right) \quad (2)$$

kde Δvzd_i je vzdialenosť testovaného bodu od povrchu odhadnutej valcovej plochy; $\Delta norm_i$ je uhol medzi normálovým vektorom v testovanom bode a medzi vektorom kolmým na smer osi valca (\vec{o}) v danom bode a t_d, t_n sú prahové hodnoty.

Parametre t_d a t_n treba zvoliť na začiatku algoritmu. t_d k polomere r vyjadruje maximálnu vzdialenosť, pre určenie vyhovujúcich bodov, prakticky to znamená, že pri hodnote $t_d = 50$ a $r = 0.200 \text{ m} \Rightarrow \frac{r}{t_d} = 0.0040 \text{ m}$, iba body, ktoré sú bližšie k valcovej ploche ako 4 mm sa považujú za vyhovujúce. Hodnota pre t_n napr. 4,5 znamená, že za vyhovujúce sa považujú body, v ktorých rozdiel medzi normálovým vektorom v danom bode (počítaným na základe malých rovinných plôch z 15 najbližších susedov) a vektorom kolmým na os valca v danom bode je menej ako $4,5^\circ$. Príliš malé hodnoty prahových hodnôt majú za dôsledok pomalú konvergenciu procesu odhadu valcovej plochy, kým príliš veľké môžu spôsobiť malý počet vyhovujúcich bodov. Hodnoty $t_d = 50$ a $t_n = 4,5$ určené empiricky môžeme považovať za optimálne. Prahové hodnoty (t_n a t_d) sú používané pri automatizovanej aktualizácii množiny vyhovujúcich bodov pri každej iterácii.

Po vykonaní iteračného spresňovania parametrov valcovej plochy, vykoná sa filtrácia na základe polomerov. Iba body ležiace na ploche valca s polomerom $r \pm t_r$ sú považované za vyhovujúce. Hodnoty r (predstavuje očakávaný polomer valca) a t_r (predstavuje prahovú hodnotu pre polomer valca) treba zvoliť na začiatku algoritmu.

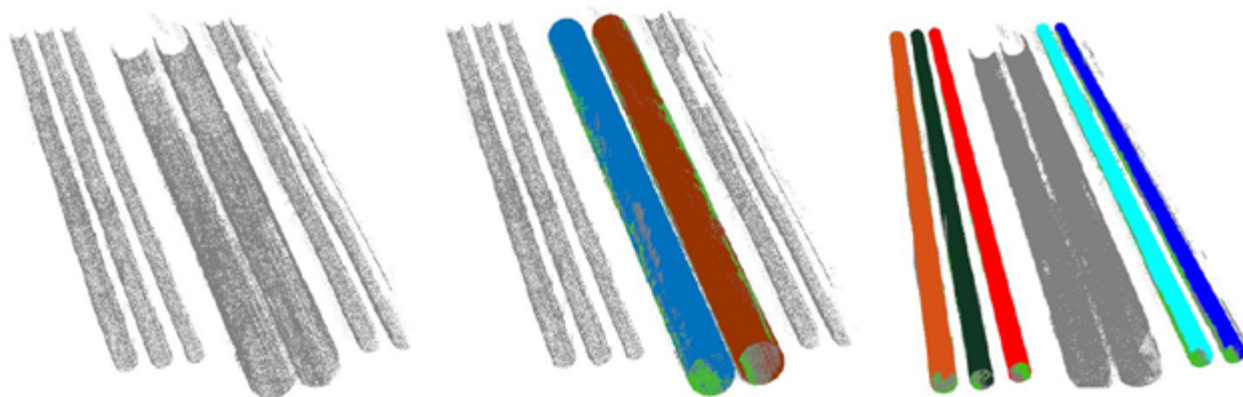
Výsledok odhadu valca závisí prvotne od náhodného výberu počiatočného bodu a od okolitej oblasti. Okrem toho z dôvodu rôznej štruktúry mračna a z dôvodu, že mračno obsahuje šum, niektoré odhadnuté valce nemusia reprezentovať charakteristické valce daného modelu. Pre vylúčenie takýchto odhadov, na záver algoritmu sa vykoná validácia odhadnutej valcovej plochy na základe určenia rozdielu parametrov odhadnutých valcov v dvoch po sebe idúcich iteráciách.

$$|\mathit{param}_i - \mathit{param}_{i-1}| < \epsilon \quad (3)$$

kde param sú parametre odhadnutej valcovej plochy; ϵ ($= 0,001$) je parameter konvergencie.

Ak odhadnuté parametre spĺňajú uvedené kritérium konvergencie (3), potom odhad je vyhodnotený ako správny a v prípade, že mračno obsahuje ďalšie valcové plochy prejde sa na nasledujúci segmentačný cyklus.

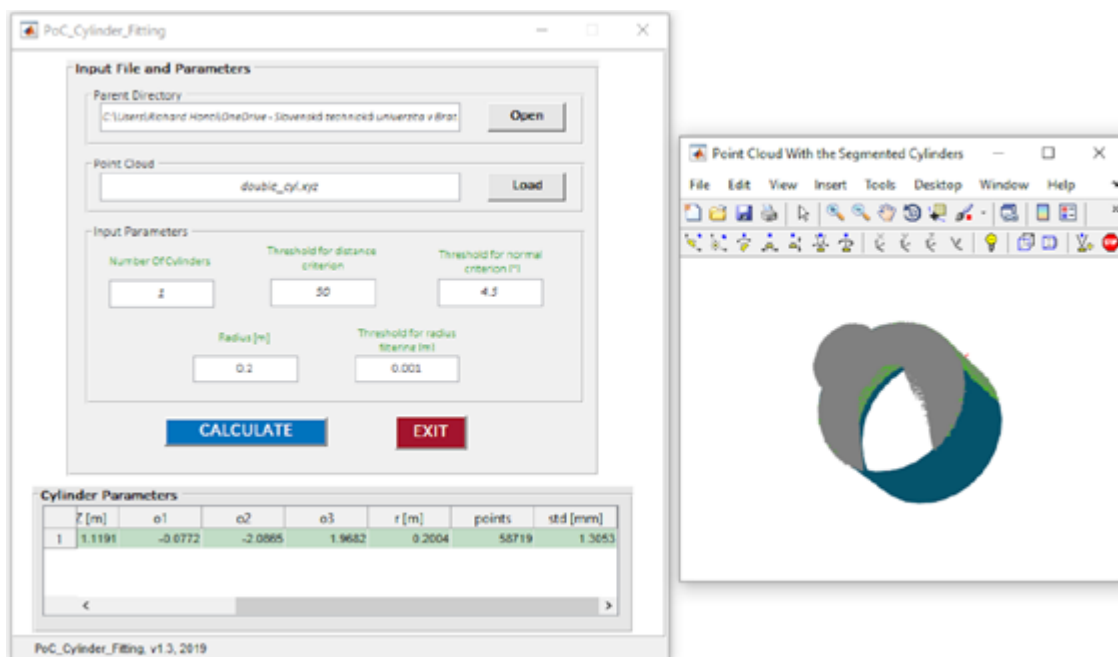
Pre experimentálne testovanie bolo použité mračno bodov potrubného systému (Obr. 7). Skenovanie bolo vykonané pomocou prístroja Trimble TX5 3D. S uvedeným prístrojom a uvážením podmienok počas skenovania, bola odhadovaná presnosť v priestorovej polohe meraného bodu hodnotou menšou ako 2,2 mm vo všetkých prípadoch. Mračno bodov (Obr. 7 – vľavo) obsahuje 7 valcov. Segmentácia bola vykonaná v 2 krokoch, z dôvodu rozličných polomerov jednotlivých valcov. V prvej etape sa vykonala segmentácia 2 valcov s polomerom cca. 0,150 m (Obr. 7 – v strede), a v druhej etape 5 valcov s polomerom cca. 0,075 m (Obr. 7 – vpravo).



Obr. 7 Mračno bodov potrubného systému s odhadnutými valcovými plochami pomocou navrhnutého algoritmu

Na Obr. 7 je zobrazený výsledok spracovania uvedeného mračna bodov s navrhnutým algoritmom. Jednotlivé valce sú farebne odlišené. Pôvodné mračno bodov obsahovalo 880 815 bodov. Štandardná odchýlka odhadu počítaná na základe kolmých vzdialeností bodov od odhadnutej valcovej plochy, dosahovala menej ako 2,0 mm vo všetkých prípadoch.

Na automatizáciu segmentácie valcov s použitím navrhnutého algoritmu bola vytvorená samostatná aplikácia PoC_Cylinder_Fitting v softvéri Matlab®. Dialógové okno aplikácie po vykonaní segmentácie je zobrazené na Obr. 8.



Obr. 8 Dialógové okno aplikácie PoC_Cylinder_Fitting

5. Záver

V dnešnej dobe využitie TLS a následná vizualizácia (resp. tvorba priestorových modelov) má veľkú perspektívu nielen v oblasti geodézie a stavebníctva (napr. pre účely ako sú rekonštrukcia objektov, vnútorných priestorov, dokumentácia, resp. kontrola skutočného vyhotovenia stavebných objektov a pod.) ale aj v rôznych iných oblastiach, ako sú architektúra, strojárstvo, robotika, archeológia a rôzne iné. V posledných rokoch môžeme zaznamenať veľký nárast záujmu o automatizáciu a zefektívnenie rôznorodých procesov vo viacerých oblastiach, platí to aj pre spracovanie mračen bodov. Pri tvorbe priestorových modelov identifikácia a segmentácia jednotlivých geometrických útvarov je jedna z najdôležitejších častí.

Predkladaná práca sa venuje problematike segmentácie mračen bodov. Pomocou segmentácie je možné vykonať identifikáciu geometrických primitív z mrača bodov. V prvej časti príspevku sú stručne uvedené možné metódy a postupy na segmentáciu geometrických útvarov z mračen bodov. Následne sú popísané navrhnuté algoritmy na segmentáciu rovín a valcov z mračen bodov. Na základe navrhnutých algoritmov boli vytvorené samostatné aplikácie pre automatizáciu a zefektívnenie výpočtu, ktoré sú tiež opísané. Okrem toho sú uvedené praktické ukážky segmentácie pomocou vytvorených aplikácií.

Pod'akovanie

„Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-18-0247“.

Literatúra

- [1] Vosselman, G. and Klein, R., "Visualisation and Structuring of Point Clouds," in *Vosselman, G. - Maas, H.G. Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Dunbeath, Whittles Publishing, 2010, pp. 45-79.

- [2] Grilli, E., Menna, F. and Remondino, F., "A review of point clouds segmentation and classification algorithms," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLII, no. (2/W3), pp. 339-344, 2017.
- [3] Nguyen, A. and Le, B., "3D Point Cloud Segmentation: A survey," *6th IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), Manila, Singapore: IEEE*, pp. 225-230, 2013.
- [4] G. Vosselman, B. G. H. Gorte, G. Sithole a T. Rabbani, „Recognising structure in laser scanner point clouds,“ *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, zv. 36, pp. 33-38, 2004.
- [5] Hough, P. V. C., „Method and means for recognizing complex patterns“. USA Patent 3069654, 18 12 1962.
- [6] M. A. Fischler a R. C. Bolles, „Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,“ *Communications of the ACM*, zv. 24, pp. 381-395, 1981.
- [7] R. Schnabel, R. Wahl a R. Klein, „Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection,“ *Computer Graphics Forum*, zv. 26, 2007.
- [8] T.-T. Tran, V.-T. Cao a D. Laurendeau, „Extraction of cylinders and estimation of their parameters from point clouds,“ *Computers & Graphics*, zv. 46, pp. 345-357, 2015.
- [9] V. Pratt, „Direct least-squares fitting of algebraic surfaces,“ *ACM SIGGRAPH Comput Graph*, zv. 21, pp. 145-152, 1987.

Radoslav Choleva¹

Študijný program: Geodézia a kartografia, ročník: druhý

OVEROVANIE MERACIEHO VÝKONU LASER TRACKERA

MEASUREMENT PERFORMANCE VERIFICATION OF LASER TRACKER

Abstract

As with any measuring instrument, the laser tracker needs to satisfied manufacturer declared precision. To verify the laser tracker measurement performance, an experiment was performed with a calibrated steel bar in a controlled laboratory environment. The length of the calibrated bar was determined at several distances from the instrument and in various measurement modes. The results of the experiment show that in a stable environment, the measurement mode does not have a major influence on the resulting precision. On the other hand, the effect of the warm-up effect has not been confirmed and another experiment is needed.

Kľúčové slová

Leica AT 960-MR, testovanie, warm-up efekt, presnosť, smerodajná odchýlka.

1. Úvod

Laser tracker (LT) ako optický merací systém sa v niektorých veciach odlišuje od klasických optických prístrojov používaných v geodetickej praxi (napr. univerzálne meracie stanice). Hlavným rozdielom je dosahovaná presnosť, ktorá sa rádovo pohybuje v mikrometroch až desiatkach mikrometrov. Dosiahnuť takúto vysokú presnosť bolo možné najmä vďaka použitiu iných technológií na meranie dĺžok. Na meranie dĺžok sa používa interferometer (IFM), absolute distance meter (ADM – elektronický diaľkomer) alebo absolute interferometer (AIFM – absolútny interferometer). Funkčné princípy uvedených spôsobov určovania dĺžky sú uvedené napr. v [1], [2], [3]. Výsledok merania však závisí od viacerých faktorov, resp. javov, ktoré je nutné počas merania brať do úvahy. Jedná sa napríklad o zahrievanie interferometra, pri ktorom sa zahrievajú aj ostatné časti prístroja (warm-up efekt), čo ovplyvňuje presnosť merania. Veľmi dôležité je sledovať atmosférické parametre (teplota, vlhkosť, tlak) v priestoroch vykonávaného experimentu, ktoré sa veľkou mierou podieľajú na výslednej neistote merania. Meranie môžu znehodnotiť vibrácie prostredia, ktoré sú bežným javom v priemyselnom prostredí a mnohé iné.

V ďalšej časti sú uvedené základné charakteristiky presnosti testovaného prístroja Leica AT 960-MR a opis použitých pomôcok. Experiment na overenie výkonu LT bol vykonaný v laboratórnych podmienkach pomocou kalibrovannej ocelevej tyče. Výsledky experimentu sú prezentované vo forme grafov a smerodajných odchýlok.

2. Použité pomôcky a prístroje

Overovaným prístrojom bol LT Leica AT 960-MR (Obr. 1). Skratka MR (medium range) v názve prístroja charakterizuje dosah merania 20 m s deklarovanou presnosťou. Prístroj používa na

¹ Radoslav Choleva, Ing., Katedra geodézie, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovensko

meranie dĺžok technológiu AIFM, čo sa odzrkadľuje aj v strednej chybe meranej dĺžky (ktorá sa v podstate zanedbáva v porovnaní s chybou merania smeru). Uhlové snímače sú rovnaké ako pri univerzálnych meracích stanicích najvyššej triedy presnosti od spoločnosti Leica, čomu zodpovedajú aj hodnoty stredných chýb (Tab. 1). Súčasťou systému je ďalej kontrolná jednotka, externý snímač teploty a riadiaci softvér na prácu s prístrojom (Tracker Pilot). Použitý LT (v. č.: 751842) bol zapožičaný od spoločnosti Hexagon v Bratislave.



Obr. 1: Leica AT 960-MR [4]

Tab. 1: Charakteristiky presnosti prístroja Leica AT 960-MR

| Parametre presnosti | Stredná chyba (1σ) | Krajná odchýlka (2σ) |
|---------------------|--|---|
| Meranie smerov | 7,5 μm + 3 $\mu\text{m}/\text{m}$ | $\pm 15 \mu\text{m}$ + 6 $\mu\text{m}/\text{m}$ |
| Meranie dĺžok | 0,25 $\mu\text{m}/\text{m}$ | $\pm 0,5 \mu\text{m}/\text{m}$ |
| Určenie 3D súradníc | 7,5 μm + 3 $\mu\text{m}/\text{m}$ | $\pm 15 \mu\text{m}$ + 6 $\mu\text{m}/\text{m}$ |

Na overenie výkonu LT bola použitá kalibrovaná oceľová tyč (Obr. 2). Na tyči sa nachádzajú tri kužeľové výseky na odrazový hranol, pomocou ktorých sú realizované dve testovacie dĺžky (referenčné dĺžky). Hodnoty dĺžok a ich neistoty boli získané z kalibračného certifikátu (Tab. 2). Konkrétna oceľová tyč sa používa zvyčajne na kalibráciu meracích ramien, preto nie je úplne prispôsobená na meranie pomocou LT. Niekedy sa však využíva pri tzv. field testoch, ktoré slúžia na rýchlu kontrolu prístroja a umožňuje ich vykonávať aj spomenutý softvér Tracker Pilot.



Obr. 2: Kalibrovaná oceľová tyč (základnica) [4]

Tab. 2: Referenčné dĺžky realizované základnicou so strednými chybami

| Označenie dĺžky | Dĺžka [mm] | Stredná chyba [mm] |
|-------------------------|------------|--------------------|
| PL (pravý – ľavý bod) | 1015,977 | 0,0027 |
| SL (stredný – ľavý bod) | 514,401 | 0,0023 |

Keďže sa jedná o oceľovú tyč s relatívne veľkou teplotnou rozťažnosťou je potrebné počas celého merania určovať jej teplotu. Na to slúži datalogger Comet MS6D s dotykovým snímačom teploty (neistota určenia teploty σ_t : $\pm (0,15^\circ + 0,002 \cdot t)$). Teplota bola meraná počas celého experimentu s intervalom 1 s.

Dôležitou súčasťou merania pomocou LT sú špeciálne odrazové hranoly, klasicky označované ako SMR (Spherically Mounted Reflector). Tradične sú uložené do guľovej, resp. sférickej formy (krytu) a existuje viacero typov a veľkostí týchto odrazových hranolov. Pri experimente boli použité dva odrazové hranoly typu RRR (Red Ring Reflector) s polomerom 0,5'' a 1,5''. Tento typ hranola má k sebe pripevnený ochranný prstenec, aby sa zamedzilo cieleňenie na hranol pod veľkým uhlom, čo zapríčiňuje chybu pri meraní dĺžok.

3. Pomocný experiment na overenie použiteľnosti odrazových hranolov

Pred začiatkom experimentu bolo nutné určiť či je možné použiť oba spomenuté odrazové hranoly. Výrobca vo svojich prospektoch uvádza, že všetky charakteristiky presnosti sú uvedené pre RRR 1,5'' a takisto by mali byť všetky testovacie procedúry vykonávané s týmto odrazovým hranolom. Dostupná kalibrovaná oceľová tyč použitá na testovanie je však určená na kalibráciu meracích ramien, a teda použitie RRR 1,5'' môže byť otázne. Z dostupných prospektov je možné zistiť, že obidva odrazové hranoly (0,5'' aj 1,5'') majú rovnaké parametre presnosti. Z hľadiska manipulácie sa zdá byť RRR 0,5'' vhodnejší na použitie ako väčší RRR 1,5'' a použitie menšieho RRR 0,5'' bolo taktiež odporúčané priamo od pracovníka Hexagon-u.

Napriek tomu bol vykonaný rýchly experiment v stabilných laboratórnych podmienkach na overenie týchto tvrdení. Klimatizované laboratórium sa nachádza na prvom nadzemnom podlaží v priestoroch spoločnosti Hexagon v Bratislave. Laboratórium má pevný betónový základ a nachádza sa mimo hlavnej dopravnej trasy, takže vibrácie sú redukované na minimum. Na overenie teplotnej stability prostredia bola kontinuálne meraná teplota na troch rôznych miestach (počas 4 hodín aklimatizácie prístroja). Rozdiel teplôt v rámci celého priestoru a za celý časový interval neprekročil 1,75 °C.

Kalibrovaná oceľová tyč bola uchytená na statív a pripevnená pomocou svoriek. Statív bol postupne umiestňovaný do troch rôznych vzdialeností od prístroja (približne 6 m, 12 m a 18 m). Maximálna meraná vzdialenosť (18 m) bola limitovaná rozmermi laboratória a ostatné vzdialenosti boli zvolené tak, aby boli dĺžky medzi stanoviskami rovnomerné. Tyč bola natočená približne kolmo na os zámerného lúča.

Meranie bolo riadené softvérom Tracker Pilot, ktorý umožňuje tri módy merania – Fast mode, Standard mode a Precise mode. Jednotlivé módy sa od seba odlišujú počtom opakovaní merania, čo sa prejavuje aj dlhším časom pri meraní. Bohužiaľ, nikde nie je uvedený presný počet opakovaní v jednotlivých módoch.

Pri experimente boli merané tri body na oceľovej tyči, ktoré realizovali dve referenčné dĺžky. Každý bod bol meraný jedenkrát v každom móde merania a v každej z troch vzdialeností od prístroja (6 m, 12 m, 18 m). Merania boli vykonané pre RRR 0,5'' aj pre RRR 1,5'' čím sa dohromady získalo 54 meraných bodov. Následne bolo zo súradníc vypočítaných 36 dĺžok (18 pre jednu ref. dĺžku a 18 pre druhú ref. dĺžku). V ďalšom kroku bolo nutné opraviť referenčné dĺžky o korekciu z teplotnej rozťažnosti podľa vzťahu:

$$d = d_0 \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)), \quad (1)$$

kde: d je dĺžka tyče opravená o teplotnú rozťažnosť, d_0 je referenčná dĺžka (získaná z certifikátu), α je koeficient teplotnej rozťažnosti, T je teplota tyče počas merania a T_0 je teplota počas kalibrácie tyče.

Následne bolo možné vypočítať rozdiely medzi referenčnými a určenými dĺžkami. Pre prehľadnosť a ľahšie porovnanie boli vypočítané priemerné hodnoty a smerodajné odchýlky z určených rozdielov pre jednotlivé použité hranoly a ref. dĺžky (Tab. 4). Aj keď sa jedná o spracovanie heterogénnych údajov (meranie z rôznych vzdialeností a pri rôznych módoch merania), tak táto analýza prináša užitočné informácie. Na základe priemerných hodnôt je možné vidieť, že pri použití RRR 1,5'' nastáva systematický posun v obidvoch určených dĺžkach rádovo v desiatkach

mikrometroch. Táto systematická chyba je zrejme spôsobená tým, že odrazový hranol s väčším polomerom nesedí dobre v kuželovom výseku na oceľovej tyči. Smerodajné odchýlky pri použití oboch hranolov dosahujú približne rovnaké hodnoty.

Tab. 3: Priemery a smerodajné odchýlky rozdielov dĺžok

| Označenie dĺžky | RRR 0,5'' | | RRR 1,5'' | |
|-------------------------|--|--|--|--|
| | Priemer rozdielov medzi ref. a urč. dĺžkou | Smerodajná odchýlka rozdielov medzi ref. a urč. dĺžkou | Priemer rozdielov medzi ref. a urč. dĺžkou | Smerodajná odchýlka rozdielov medzi ref. a urč. dĺžkou |
| PL (pravý – ľavý bod) | -0,010 mm | 0,017 mm | -0,056 mm | 0,012 mm |
| SL (stredný – ľavý bod) | -0,005 mm | 0,024 mm | -0,040 mm | 0,018 mm |

Na zistenie presnej hodnoty systematického posunu by bolo potrebné vykonať viac meraní. Avšak samotný výskyt systematického posunu môže poslúžiť ako ďalší argument na použitie RRR 0,5'' v ďalších experimentoch.

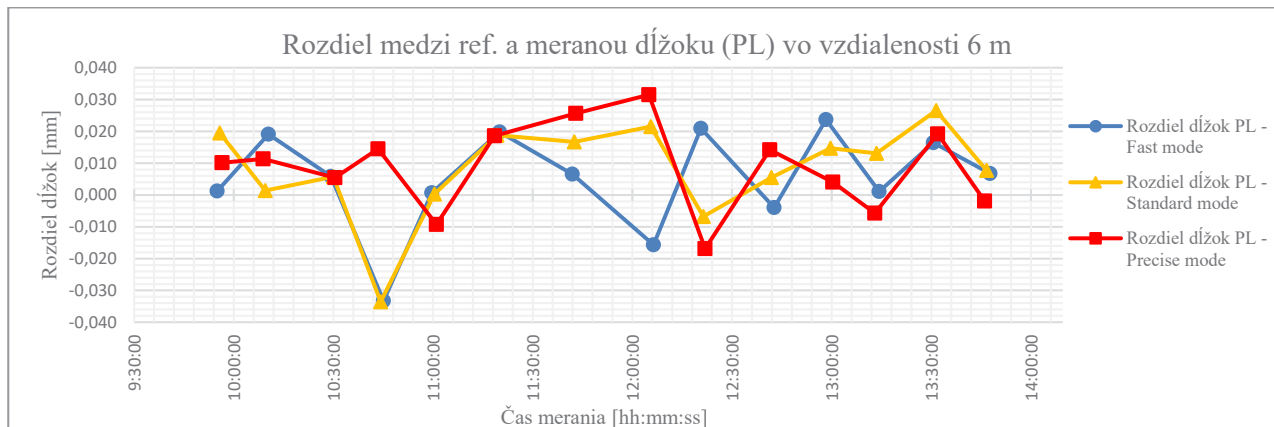
4. Experiment na overenie meracieho výkonu LT

Pri bežných geodetických aplikáciách je pred meraním zvykom aklimatizovať prístroj v prostredí, v ktorom budeme vykonávať meranie. Je to z dôvodu, že zmeny v teplotách spôsobujú rozťažnosť jednotlivých častí prístroja. Pri práci s LT však musíme uvažovať s ďalším problémom, ktorý vychádza z použitej technológie na meranie dĺžok. V tomto prípade sa jedná o technológiu AIFM, ktorej súčasťou je interferometer. Po zapnutí prístroja sa vykonáva proces inicializácie, pri ktorom sa interferometer zahrieva. Spolu s ním sa však zahrievajú aj ostatné časti prístroja (warm-up effect) [5]. Aby sme mohli vykonávať presné merania je nutné, aby sa táto teplota stabilizovala. Po vykonaní inicializácie sa odporúča počkať približne 30 – 40 minút na ustálenie teploty, pri ktorej by mali byť dosahované hodnoty presnosti také, ako je uvedené v Tab. 1. Po 3 – 4 hodinách od inicializácie by sa stredné chyby mali dokonca zlepšiť o 50%.

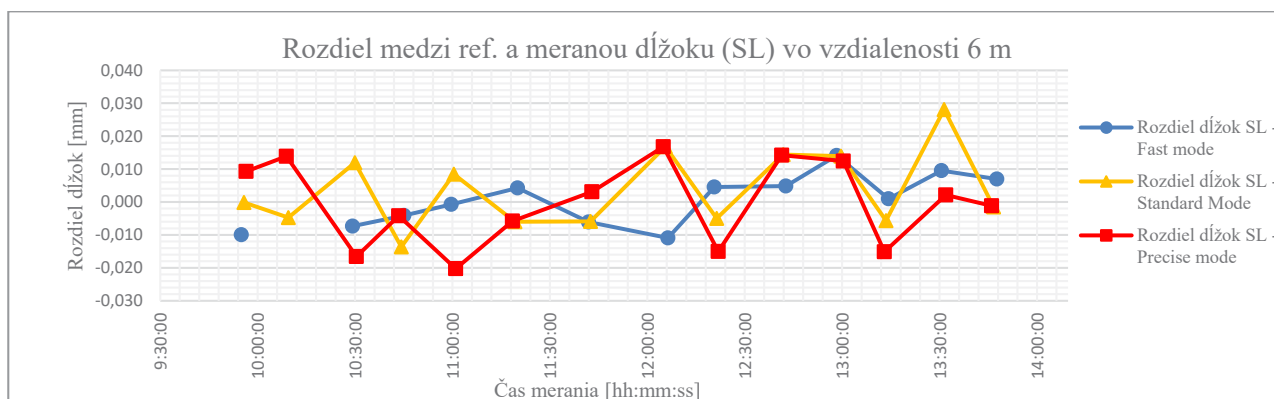
Pri ďalšom experimente bola snaha sledovať, ako sa budú vyvíjať rozdiely medzi určovanými a referenčnými dĺžkami v časovom úseku 4 hodiny od zapnutia (inicializácie) prístroja. Ako bolo spomenuté vyššie, v tomto časovom intervale by malo postupne dochádzať k ustáleniu teploty prístroja, čo by sa malo odzrkadľovať na veľkosti rozdielov dĺžok. Meranie bolo vykonané v rovnakých priestoroch a s rovnakými pomôckami ako experiment s odrazovými hranolmi, použitý bol však teraz iba RRR 0,5''.

Základnica bola postupne umiestňovaná s rovnakou orientáciou a v rovnakých vzdialenostiach ako pri predchádzajúcom experimente (6 m, 12 m, 18m) a meranie bolo opäť vykonané vo všetkých troch módoch (Fast, Standard, Precise). Počas 4 hodín bolo pre každý mód merania a každú vzdialenosť odmeraných 42 bodov, čo vo výsledku dáva počet 378 meraných bodov. Zo súradníc bodov boli následne určené dve sady dĺžok na porovnanie s referenčnými dĺžkami základnice. Pre každý mód merania a každú vzdialenosť bolo určených 28 dĺžok (14 pre jednu ref. dĺžku a 14 pre druhú ref. dĺžku). Celkový počet určených dĺžok bolo 84. Pre vypočítanie rozdielov medzi ref. a určovanými dĺžkami bolo nutné opäť zaviesť korekciu z teplotnej rozťažnosti podľa vzťahu (1). Následne bolo možné vypočítať spomenuté rozdiely pre všetky módy merania a pre všetky vzdialenosti základnice od LT. V ďalšom kroku bola vykonaná štatistická analýza na určenie prítomnosti extrémnych hodnôt pomocou Grubbsovho testu [6]. Na základe výsledku testovania boli

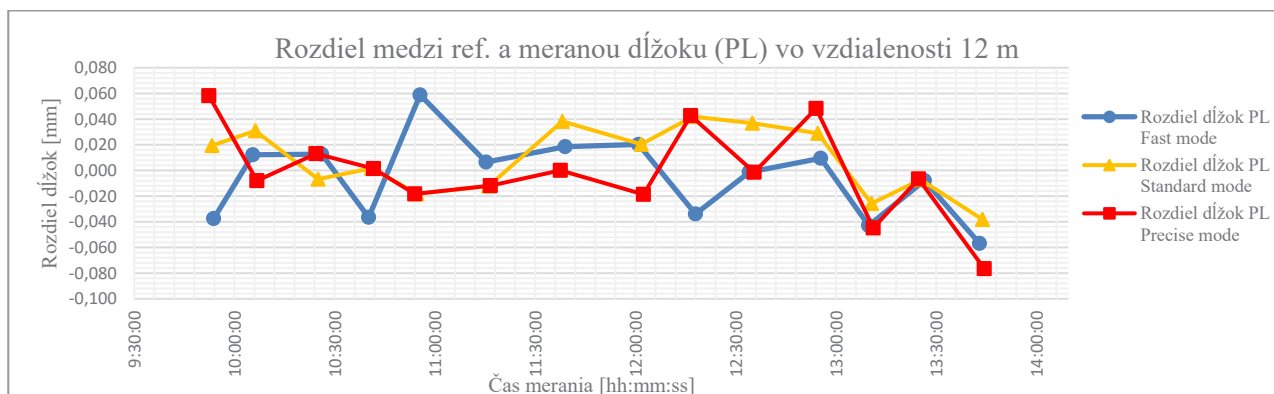
zo súboru odstránené dve hodnoty s pravdepodobnosťou správneho rozhodnutia 95%. Vylúčenými hodnotami bol rozdiel dĺžok SL vo vzdialenosti 6 m a pri móde merania Fast a rozdiel dĺžok PL vo vzdialenosti 18 m pri móde merania Precise. Všetky ostatné hodnoty boli zobrazené do prehľadných grafov (Obr. 3 – 8). Pri vizuálnej kontrole grafov, je možné vidieť, že aj niektoré ďalšie hodnoty rozdielov majú pravdepodobne charakter hrubých chýb, štatistickou analýzou sa však tieto domnienky nepotvrdili. Na lepšie porovnanie výsledkov boli opäť vypočítané smerodajné odchýlky pre všetky určované typy rozdielov (Tab. 4).



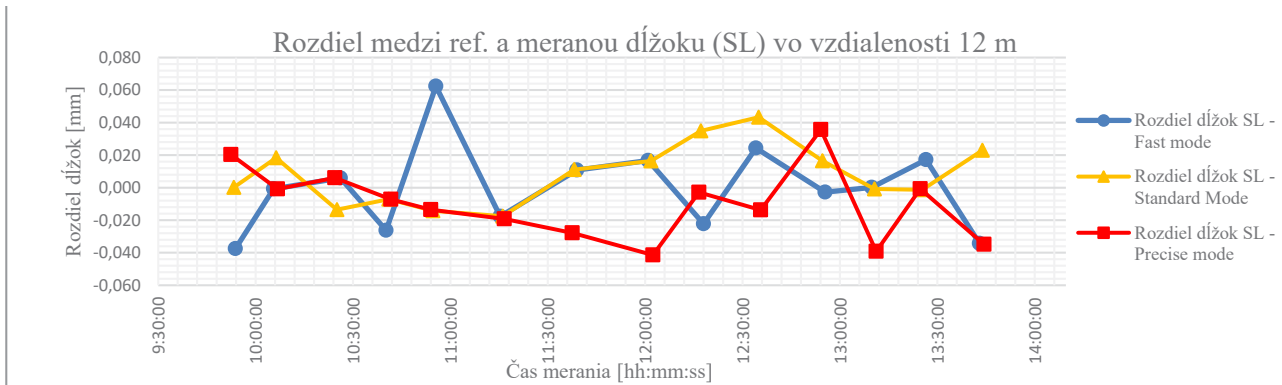
Obr. 3: Rozdiely medzi referenčnou a určenou dĺžkou (PL) vo vzdialenosti 6 m



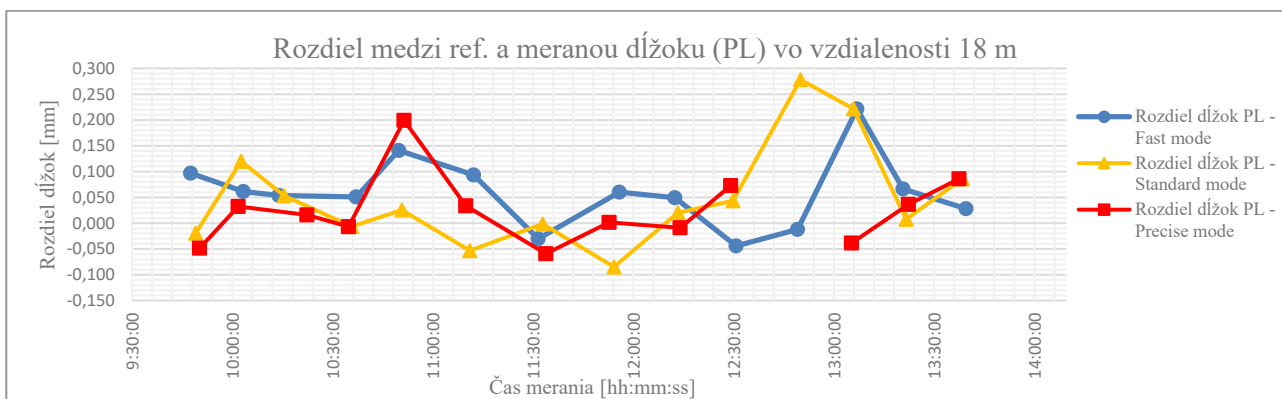
Obr. 4: Rozdiely medzi referenčnou a určenou dĺžkou (SL) vo vzdialenosti 6 m



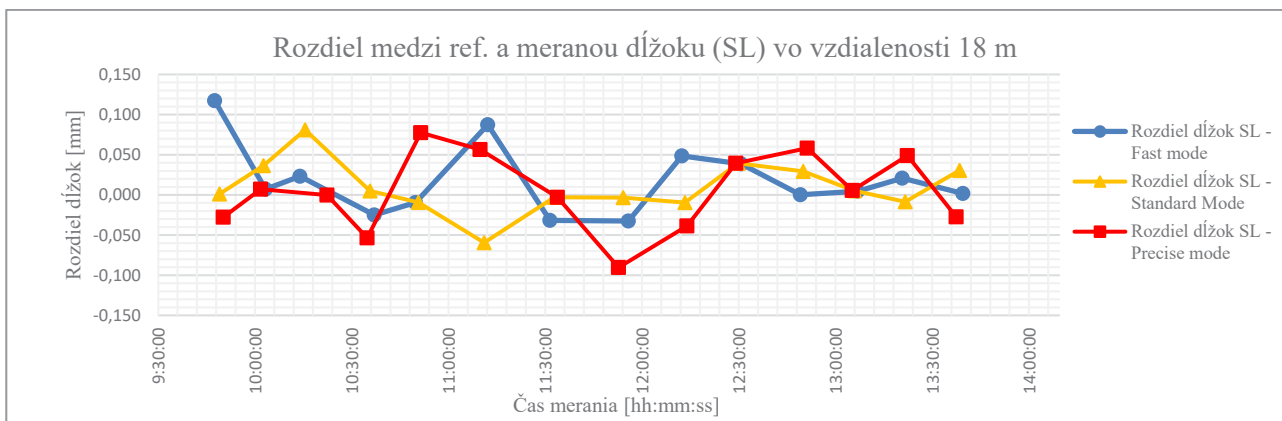
Obr. 5: Rozdiely medzi referenčnou a určenou dĺžkou (PL) vo vzdialenosti 12 m



Obr. 6: Rozdiely medzi referenčnou a určenou dĺžkou (SL) vo vzdialenosti 12 m



Obr. 7: Rozdiely medzi referenčnou a určenou dĺžkou (PL) vo vzdialenosti 18 m



Obr. 8 : Rozdiely medzi referenčnou a meranou dĺžkou (SL) vo vzdialenosti 18 m

Tab. 4: Smerodajné odchýlky rozdielov

| Vzdialenosť od prístroja | 6 m | | | 12 m | | | 18 m | | |
|-----------------------------|-------|----------|---------|-------|----------|---------|-------|----------|---------|
| | Fast | Standard | Precise | Fast | Standard | Precise | Fast | Standard | Precise |
| Smerodajná odchýlka PL [mm] | 0,015 | 0,015 | 0,013 | 0,031 | 0,025 | 0,034 | 0,066 | 0,097 | 0,068 |
| Smerodajná odchýlka SL [mm] | 0,008 | 0,011 | 0,012 | 0,026 | 0,018 | 0,021 | 0,042 | 0,031 | 0,047 |

Po vykreslení časového radu v grafe sa nedá jednoznačne určiť hodnota trendu alebo periodickej zložky. Merania počas celej doby trvania experimentu vykazujú náhodný charakter a nedá sa teda potvrdiť, že by na začiatku merania prístroj meral výrazne horšie. Okrem niektorých hodnôt, ktoré sa na základe grafického znázornenia zdajú byť odľahlé, všetky vypočítané rozdiely zodpovedajú presnosti použitého prístroja. Tieto väčšie odchýlky mohli vzniknúť pri manipulácií so základnicou počas merania, resp. kvôli tomu, že použité pomôcky neboli ideálne pre tento typ úlohy.

Na základe údajov uvedených v tabuľke (Tab. 5) je možné vysloviť niekoľko záverov. So zväčšujúcou vzdialenosťou od prístroja sa logicky zväčšujú aj smerodajné odchýlky. Z hľadiska módu merania nie je výrazný rozdiel v smerodajných odchýlkach a je možné tvrdiť, že zvýšenie počtu opakovaní merania v jednotlivých módoch neprispieva k zlepšeniu samotnej presnosti merania. Jediný rozdiel je smerodajná odchýlka pri meraní v Standard móde pri vzdialenosti 18 m. Z grafu vyplýva, že v tomto prípade môže za väčší rozdiel zrejme odľahlá hodnota, ktorá však nebola zistená a odstránená pri štatistickom testovaní.

5. Záver

Úlohou experimentu bolo overenie meracieho výkonu LT Leica AT 960-MR, pomocou merania kalibrovannej oceľovej tyče. Pred meraním bola overená použiteľnosť odrazových hranolov, pričom bol nakoniec použitý iba RRR 0,5''. Na základe výsledkov experimentu popísaného v predošlých častiach sa môže vysloviť záver, že prístroj meria v poriadku a je možné ho naďalej používať. Experiment však nepreukázal vplyv zahrievania prístroja na presnosť merania po inicializácii prístroja, resp. postupnú redukciu tohto vplyvu pri dlhšom meraní. Môže to byť spôsobené použitými pomôckami, ktoré nie sú určené na testovanie LT. Ďalším dôvodom môže byť malá hustota meraní počas 4 hodiny trvajúceho experimentu. Z hľadiska módov merania sa preukázalo, že nemajú výrazný vplyv na výslednú presnosť merania. Ak sa experiment vykonáva v stabilnom prostredí a so správnymi atmosférickými korekciami, tak sa môže použiť Fast mode, resp. Standard mode, čo urýchli proces merania.

PodĎakovanie

Tento článok vznikol vďaka podpore Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied pre projektu VEGA-1/0506/18.

Literatúra

- [1] RENISHAW. Interferometry explained. 2018. Dostupné na: <https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>.
- [2] MURALIKRISHNAN, B., et al. Laser trackers for large-scale dimensional metrology: A review, *Precision Engineering*, 2016, č. 44, s. 13–28. ISSN 0141-6359.
- [3] HARDING, K. *Handbook of Optical Dimensional Metrology*. CRC Press. 480 s. ISBN 978-1-4398-5482-2
- [4] HEXAGON. 2019. Dostupné na: <https://www.hexagonmi.com>
- [5] GASSNER, G. a RULAND, R. Instrument Tests With the New Leica At401. *Slac-Pub-14300*, 2011, 5 s.
- [6] GRUBBS, F. Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. *Technometrics*, 1969 č. 11, s. 1–21.

Martin Leško¹

Study field: Geodesy and Cartography; Year: fourth

Application of the Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar (PSInSAR) and Small Baseline Subset (SBAS) for monitoring terrain changes in Upper Nitra region

Aplikovanie metódy stabilných odrazových prvkov (PSInSAR) a metódy využívajúcej krátke základnice (SBAS) na monitorovanie zmien terénu v regióne Horná Nitra

Abstract

Landslides represent the most risky type of natural danger in Slovakia, so there is a need to search for new monitoring options. This paper deals with utilization of satellite radar data to monitor the situation in the Upper Nitra region. In this area, where landslides occur due to the geological structure of the region, engineering-geological survey has been carried out in recent years. Two methods, Small Baseline Subset (SBAS) and Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar (PSInSAR), were used to monitor terrain changes. The results of both methods are compared.

Key words

InSAR, landslides, Persistent Scatterer InSAR, Small Baseline Subset.

1. Introduction

Time series analysis of InSAR data, which observes the displacement of the Earth's surface over time, is an indispensable tool in many fields of Earth science. Several algorithms have been developed for time series analysis of InSAR data: Coherent Pixels Technique (CPT) [2], Delft Persistent Scatterer Interferometry (DePSI) [14],[15], Interferometric Point Target Analysis (IPTA) [28], Permanent Scatterer InSAR (PSInSAR) [6],[7], Persistent Scatterer Pairs (PSP) [3],[4], Quasi Persistent Scatterer (QPS) [24], Small Baseline Subset (SBAS) [1],[18], Stable points Network (SPN) [5],[16], SqueeSAR [9],[10] and Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS) [11],[12].

All these techniques aim to connect wrapped phase measurements to produce a near continuous record of displacement. Despite their common goal of producing an unwrapped time series of InSAR phase observations, these algorithms have important theoretical and practical differences. For instance, some algorithms rely mostly on persistent scatterers (PS), while other focus on distributed scatterers (DS). Both types of scatterers have real physical differences, such as reflected power and the size of the target relative to the resolution cell.

Two methods are mentioned below, PSInSAR and SBAS. The following chapter includes only a brief description. For more information on the differences between the two methods and the other methods too, the reader is referred to [23].

¹Martin, Leško, Ing., Department of Theoretical Geodesy, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského 11, block A, 6th floor, 810 05 Bratislava

2. Methods used

Both methods are briefly characterized in the following Table 1.

Table 1: Comparison of PSInSAR and SBAS (modified from [19])

| Method | Phase | Element | Network | Solver | Scatterer |
|---------|-----------|---------|---------------|---------------|-------------|
| PSInSAR | Wrapped | Arc | Single master | Periodogram | Point |
| SBAS | Unwrapped | Point | Multi-master | Least squares | Distributed |

2.1 Permanent Scatterer InSAR (PSInSAR)

The PSInSAR algorithm was developed to use the persistent scatterers (PS), which have dimensions smaller than the SAR resolution cell [7],[15]. This means, that PS are not affected by the baseline decorrelation, and a single master stack of interferograms can be formed even if the baselines are longer than the critical baseline, which results in phase decorrelation for distributed scatterers (DS). If no baseline decorrelation is present all acquired data can be used to form interferograms. This is considered as a key advantage of PSInSAR algorithm. With this method it is possible to achieve a sub-meter accuracy of Digital Elevation Model (DEM) and a few millimeters accuracy of a surface motion [8]. The PS can be geolocated more accurately than DS.

In order to select persistent scatterer candidates (PSC), the amplitude dispersion method is applied. The basic idea of this method is that the same level of noise applied to a strong (high amplitude) scatterer and a weak (low amplitude) scatterer while the phase change due to the same amount of noise will be much less in the strong scatterer.

Important processing step is to calculate atmospheric phase screen (APS), which starts with the estimation of the master APS. Since the interferograms are formed as a single master stack, all interferograms have the atmospheric contribution from the master acquisition, which can be estimated by an average of the residuals. Once the atmospheric phase contribution for all the PSC in the master acquisition is known, APS is calculated in the spatial domain for the master acquisition. The same way can be applied to calculate the APS for other acquisitions. PSInSAR requires a larger number of scenes available (more than 10) for reliable solution.

2.2 Small Baseline Subset (SBAS)

The SBAS algorithm utilizes distributed scatterers (DS) and singular value decomposition to connect independent multiple unwrapped interferograms in time [1],[17]. The master and slave pairs for these interferograms are selected using average baseline parameters for the signal of interest. In case of deformation analysis, baseline parameters can be set to 25% of the critical baseline (≈ 400 m) and ≈ 1 year for temporal baseline.

The short temporal baselines are especially needed for highly variable phenomena to minimize temporal decorrelation. SBAS modification, in which only interferograms with short temporal baselines are used, is called Small Temporal Baseline Subset (STBAS).

DS can be affected by baseline decorrelation, which happens more often in non-urban areas.

Atmospheric filtering is done by extracting the signal with high spatial and low temporal correlation using a spatio-temporal filter, as is the case for PSInSAR [6],[7].

3. Application

The monitored area is shown in Figure 1. The paper is specifically focused on two villages, Hradec and Veľká Lehôtka, which were affected by slope failures between November 2012 and May 2013. The geological structure is characterized by high sensitivity to anthropogenic interventions, and at the same time it creates suitable conditions for rainwater infiltration. Landslides occurred on slopes formed by clays and clays containing deluvial sediments in Hradec and alluvial sediments in Veľká Lehôtka [13],[21].

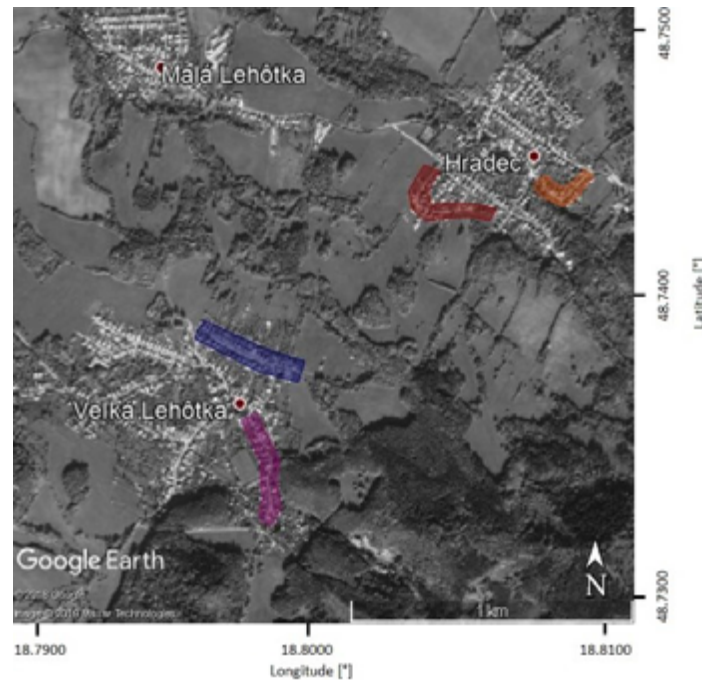


Figure 1: Monitored area - Hradec and Veľká Lehôtka. Slides damaged anthropogenic objects on the following streets: Pavlovská (red colour), Na Stanište (orange colour), Remeselnícka (blue colour) and Podhorská (purple colour).

Sentinel-1 data acquired over Upper Nitra region between October 2014 and January 2018 were analyzed to obtain landslide rate using PSInSAR and SBAS techniques. The monitored area is covered by three satellite orbits: two descending orbits numbers 51 and 124 and one ascending orbit number 175. For more detailed information, see Table 2. The graphical representation of the area coverage by satellite images is shown in Figure 2.

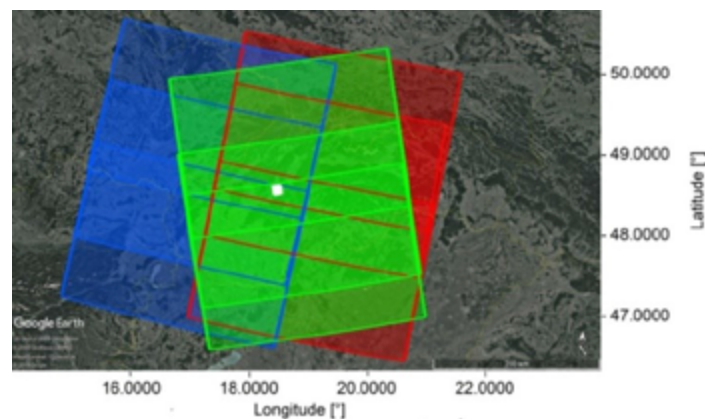


Figure 2: Radar coverage of the monitored area: orbits no. 51 (red), 124 (blue) and 175 (green).

Table 2: Overview of the satellite radar images

| Orbit | | Satellite | Number of radar images | Time interval |
|------------|--------|--------------|------------------------|-------------------------------|
| Type | Number | | | |
| Ascending | 175 | Sentinel-1 A | 89 | from 22.11.2014 to 26.01.2018 |
| | | Sentinel-1 B | 32 | from 30.09.2016 to 31.10.2017 |
| Descending | 51 | Sentinel-1 A | 79 | from 09.10.2014 to 21.01.2018 |
| | | Sentinel-1 B | 36 | from 04.10.2016 to 27.01.2018 |
| | 124 | Sentinel-1 A | 88 | from 24.10.2014 to 26.01.2018 |
| | | Sentinel-1 B | 36 | from 02.11.2016 to 20.01.2018 |

From October 2014 to September 2016 only the Sentinel-1 A data were available every 12 days. From September 2016 to January 2018, Sentinel-1 B satellite data could also be retrieved, reducing the temporal baseline to 6 days. For both, PSInSAR and SBAS, temporal baselines are suitable for terrain changes detection.

Both methods have been applied to SARPROZ© [24] software, which runs on the MATLAB© [27] software platform. In SBAS processing, an approach was used in which multiple interferograms were generated within consecutive pairs of radar image. In the case of PSInSAR processing, much longer temporal baselines are also considered. The single master stacks of interferograms were generated with respect to one (master) image. The temporal baseline used is shown in Figure 3. Information on the amount of generated interferograms is shown in Table 3.

The interferogram phase provided information about the height differences that occurred in the monitored area at the time interval in which the images were generated. Basically, it is possible to record a change that occurred within a period between two satellite radar images. All generated interferograms were used to estimate the average rate over the entire monitored period.

In order to characterize the nature of the changes in the site of interest, a set of stable scatterers was required, which were characterized by high phase stability throughout the given time interval. For this purpose, a parameter called the amplitude stability index was used. In this case, the values of stability index ranged from 0.6 to 0.95. The values of amplitude stability index differ, because the partial objective was to obtain approximately equal set of stable reflectors for all treatments. Looking at Figure 3, it can be seen that the temporal decorrelation of multiple frame pairs in the PSInSAR method reduces the coherence value, so lower amplitude stability index values have been used to generate a plurality of reflection elements. In the SBAS method, the temporal decorrelation is lower, so higher values of the selected parameter have been applied and the number of stable reflectors has been preserved. The average annual velocity was calculated for each stable reflector.

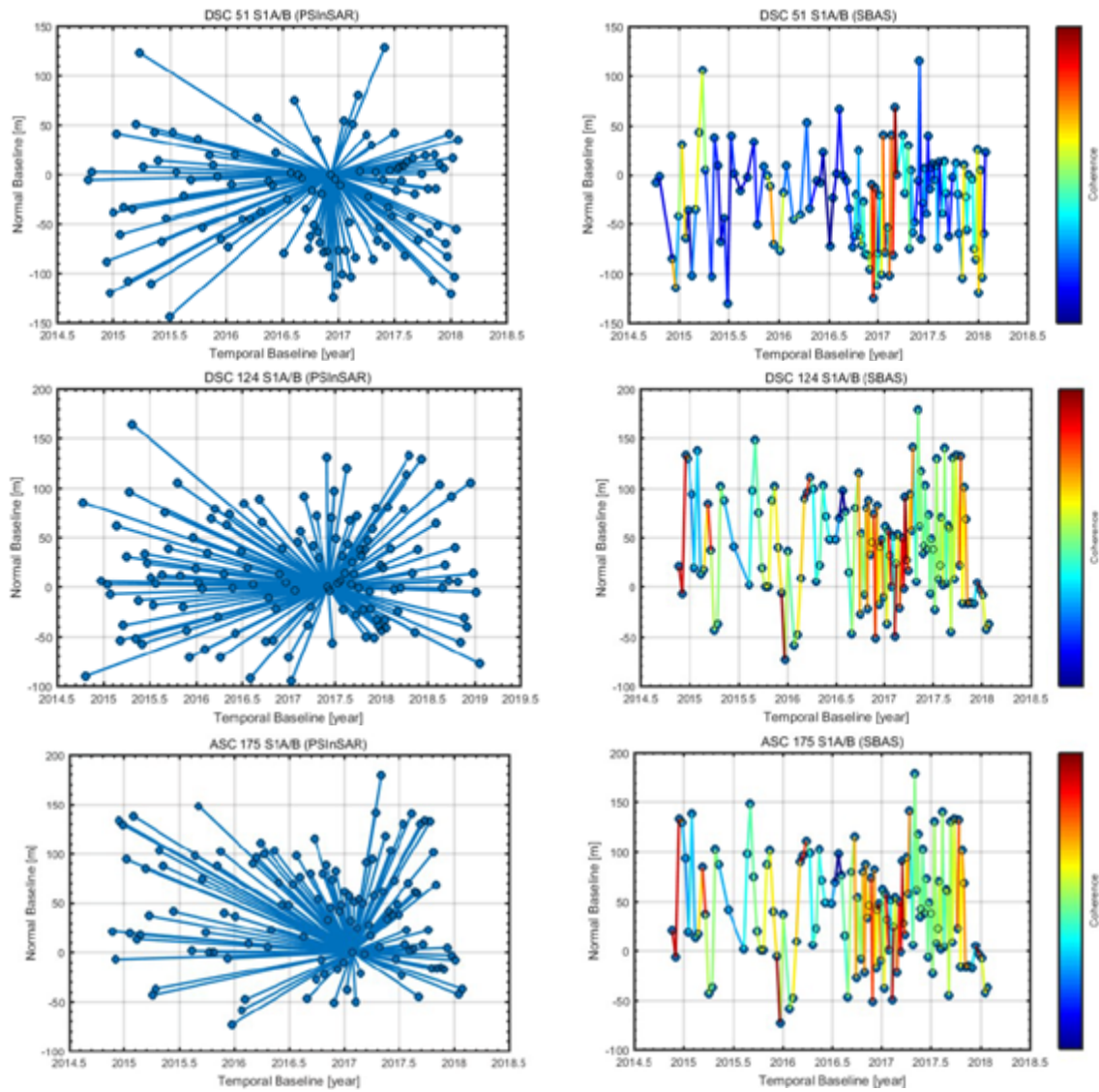


Figure 3: Temporal and spatial (normal) baselines. On the left are graphs for PSInSAR processing and on the right for SBAS processing. Coherence is shown only for SBAS baselines.

Table 3: Overview of the interferograms

| Orbit | | Method | Number of interferograms |
|------------|--------|---|--------------------------|
| Type | Number | | |
| Ascending | 175 | PSInSAR (single master stack of interferograms) | 120 |
| | | SBAS (multiple interferograms) | 120 |
| Descending | 51 | PSInSAR (single master stack of interferograms) | 114 |
| | | SBAS (multiple interferograms) | 114 |
| | 124 | PSInSAR (single master stack of interferograms) | 123 |
| | | SBAS (multiple interferograms) | 123 |

4. Results and discussion

Coherence was initially considered when generating a set of stable reflectors. However, coherence is estimated as the average coherence of the reflected signal from all elements in one pixel. That is, the coherence of the dominant element, within the pixels, also includes the decorrelation caused most often by the appearance of vegetation at the same pixel. In this way, the pixels located on the boundary between the built-up area and the vegetation cover were mainly affected. Ultimately, this led to a reduction in the number of generated stable reflectors. By using the amplitude stability index, a larger set is obtained that allows the changes in the selected site to be characterized in more detail.

In each stable reflective element, the average velocity of the transmitted signal was estimated in millimetres per year (mm / year). A graphical representation of the resulting average annual velocities can be found in Figure 4. The results point to compliance with the findings of engineering-geological surveys and thus, in addition to the northern part, there is still active movement of slopes in other areas of Hradec. It is a larger area than the landslides in 2012 and 2013. In case of Veľká Lehôtka, physical activity is detected in the northern and eastern parts of the municipality, which corresponds to the affected areas in 2012 and 2013.

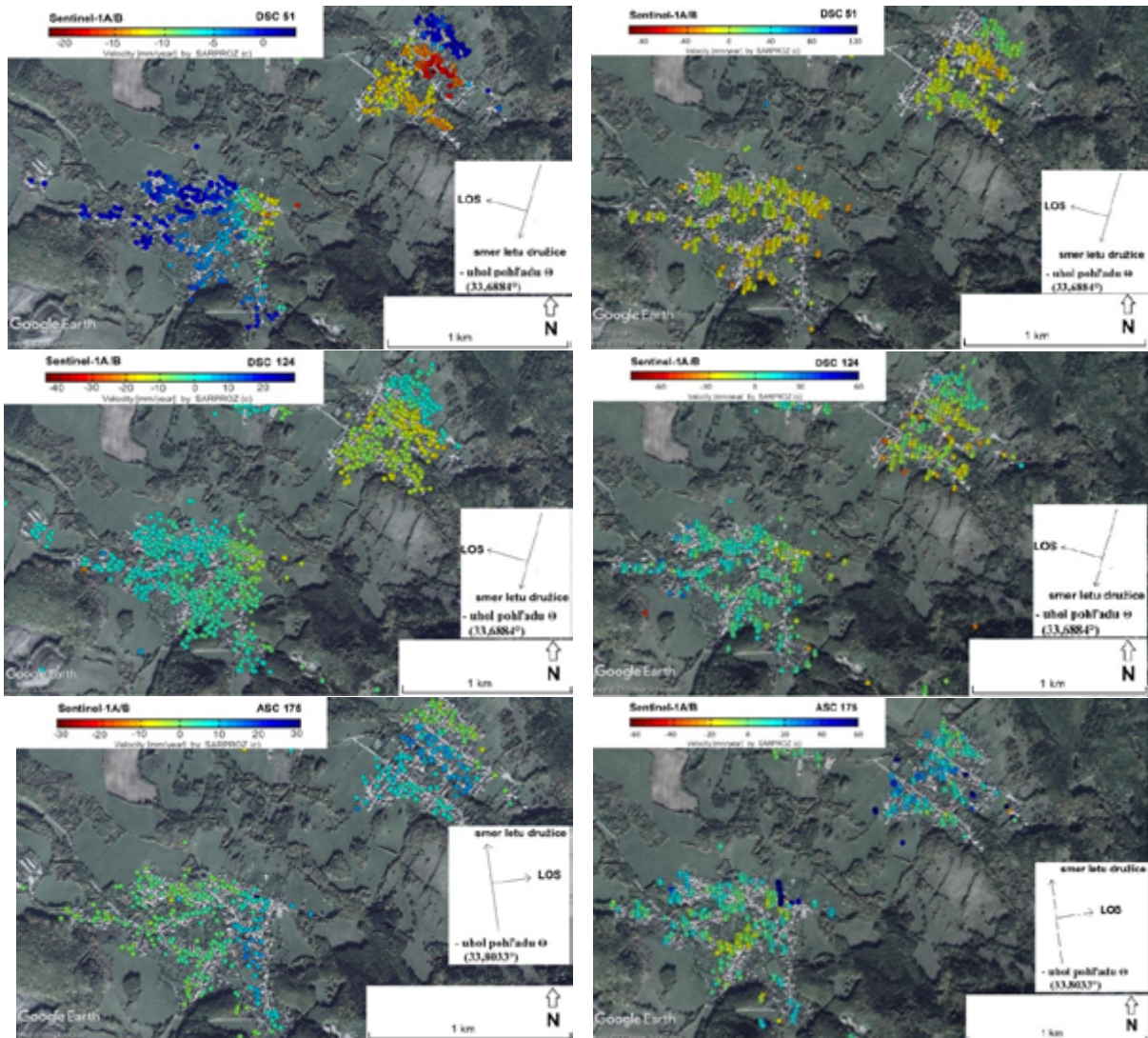


Figure 4: The mean annual line-of-sight velocities of reflectors estimated by PSInSAR (left) and SBAS (right)

On the graphical outputs (Figure 4) can be seen, that there are territories in the marginal areas of built-up regions, where the presence of stable reflective elements is absent. The likely reason is that, despite the use of the amplitude stability index, vegetation causes strong decorrelation. A possible way to increase the set in these parts is to apply another SBAS approach, whereby the entire set of satellite radar images is split into smaller sets, and within them, pairs are searched for where the effect of decoration is as small as possible.

The average annual velocity of movement in the affected parts of municipalities is very similar from both methods. These conclusions could lead to the assumption that despite the security work carried out, the site is still active.

An interesting phenomenon is that the results of the processing of radar satellite images from descending tracks no. 51 and 124; the area appears to be declining. With the ascending path, the reflective elements look as if they are rising. This observed phenomenon offers more detailed information on the direction of terrain movement. This is due the fact that an average annual velocities are computed in a line-of-sight direction. In this direction (to or from the satellite) the radar antenna is most sensitive to terrain movement. The Sentinel-1A / B satellites monitor the Earth's surface from the right side and move along the near polar path. This means, that when moving on a descending path, they send a signal approximately from east to west, and in the opposite direction when moving on the ascending path. Based on this information, the idea is that the terrain is moving east to west. Therefore, in ascending path, the terrain appears to rise as it approaches the satellite track. More detailed motion information can be obtained by decomposing the velocity vector in the direction of the transmitted signal to a horizontal and vertical component, for example according to [26]. The decomposition of PSInSAR processing results from the territory of this paper is presented in [22], and along with the time series in [20].

5. Conclusion

Both methods, PSInSAR and SBAS, detected slope movement in Hradec and Veľká Lehôtka. Most persistent scatterers reach velocities in the range of 5 to 10 mm / year, in both cases. These values represent the movement of the slope at the crawling stage, which coincides with [13] despite the remediation work in the area. From the estimated data, it can be assumed that the area moves from east to west, which corresponds to the slope of the area and is also confirmed by the decomposition of the velocity vector in [20] and [22].

The results are influenced by the decorrelation caused by vegetation predominantly in peripheral areas. This is manifested by a reduced number of stable reflection elements and an increase in the reflected signal noise of the elements that have met the desired amplitude stability condition.

The used radar data was generated in the C-band of electromagnetic radiation. However, in order to better understand the effects of wavelength, spatial resolution and repetition period on the estimation of the velocity of the reflective elements, it would be convenient to compare the results with the L and X bands.

Acknowledgment

The Sentinel-1 data was provided by ESA as part of the policy of providing free and full data as part of Copernicus. This work was supported by the Slovak Grant Agency VEGA within the project number 1/0462/16. The authors thank the State Geological Institute of Dionýz Štúr and the Upper Nitra Mine Prievidza, a.s. for discussion and cooperation.

References

- [1] BERARDINO, P. - FORNARO, G. - LANARI, R. - SANSOSTI, E. *A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms*. Geoscience and Remote Sensing. 2002. vol. 40, no. 11, pp. 2375-2383.
- [2] BLANCO-SANCHEZ, P. - MALLORQUÍ, J.J. - DUQUE, S. - MONELLS, D.: *The Coherent Pixels Technique (CPT): An Advanced DInSAR Technique for Nonlinear Deformation Monitoring*. Pure and Applied Geophysics. 2008. vol. 165, no. 6, pp. 1167-1193.
- [3] COSTANTINI, M. - FALCO, S. - MALVAROSA, F. - MINATI, F. *A New Method for Identification and Analysis of Persistent Scatterers in Series of SAR Images*. Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2008. vol. 2, pp. 449-452.
- [4] COSTANTINI, M.- MALVAROSA, F. - MINATI, F. *A General Formulation for Redundant Integration of Finite Differences and Phase Unwrapping on a Sparse Multidimensional Domain*. Geoscience and Remote Sensing. 2012. vol. 50, no. 3, pp. 758-768.
- [5] CROSETTO, M. - BIESCAS, E. - DURO, J. - CLOSA, A. - ARNAUD, A. *Generation of Advanced ERS and Envisat Interferometric SAR Products Using the Stable Point Network Technique*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2008. vol. 74, no. 4, pp. 443-450.
- [6] FERRETTI, A. - PRATI, C. - ROCCA, F. *Nonlinear Subsidence Rate Estimation using Permanent Scatterer in Differential SAR Interferometry*. Geoscience and Remote Sensing. 2000. vol. 38, no. 5, pp. 2202-2212.
- [7] FERRETTI, A. - PRATI, C. - ROCCA, F. *Permanent Scatterer in SAR Interferometry*. Geoscience and Remote Sensing. 2001. vol. 39, no. 1, pp. 8-20.
- [8] FERRETTI, A. - SAVIO, G. - BARZAGHI, R. - BORGHI, A. - MUSAZZI, S. - NOVALI, F. -PRATI, C. - ROCCA, F. *Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation*. Geoscience and Remote Sensing. 2007 b. vol. 45, no. 5, pp. 1142-1153.
- [9] FERRETTI, A. - NOVALI, F. - FUMAGALLI, A. - PRATI, C. - ROCCA, F. - RUCCI, A. *Beyond PSInSAR: The SqueeSAR Approach*. In: *American Geophysical Union, Fall Meeting 2009*. 2009. Abstract id. G31A-02.
- [10] FERRETTI, A. - FUMAGALLI, A. - NOVALI, F. - PRATI, C. - ROCCA, F. - RUCCI, A. *A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR*. Geoscience and Remote Sensing. 2011. vol. 49, no. 9, pp. 3460-3470.
- [11] HOOPER, A. - ZEBKER, H. - SEGALL, P. - KAMPES, B. *A New Method for Measuring Deformation on Volcanoes and Other Natural Terrains Using InSAR Persistent Scatterers*. Geophysical Research Letters. 2004. vol. 31, no. 23. p. 5.
- [12] HOOPER, A. *A Multitemporal InSAR Method Incorporating Both Persistent Scatterer and Small Baseline Approaches*. Geophysical Research Letters. 2008. vol. 35, no. 16, p. 5
- [13] ILKANIČ, A. - JASOVSKÁ, A. - NIRGRINYOVÁ, J. - PILKO, M. - SMREK, M - VASILKO, T. *Záverečná správa. Inžinierskogeologický prieskum postihnutých lokalít v miestnych častiach Veľká Lehôtka a Hradec*. Banská Bystrica: ENVIGEO, 2013. p. 50.
- [14] KAMPES, B. *Displacement Parameter Estimation using Permanent Scatterer Interferometry*. PhD. Thesis. Technische Universiteit Delft. 2005.
- [15] KAMPES, B. *Radar Interferometry - Persistent Scatterer Technique*. Springer 2006. 221 p. ISBN-13 978-1-4020-4576-9 (HB)
- [16] KUEHN, B. - ALBIOL, B. - COOKSLEY, G. - DURO, J. - GRANDA, J. - HAAS, S. - HOFFMANN-ROTHER, A. - MURDOHARDONO, D. *Detection of Land Subsidence in Semarang, Indonesia, Using Stable Points Network (SPN) Technique*. Environmental Earth Sciences. 2010. vol. 60, no. 5, pp. 909-992.
- [17] LANARI, R. - MORA, O. - MANUNTA, M. - MALLORQUÍ, J.J. - BERARDINO, P. - SANSOSTI, E. *A Small-Baseline Approach for Investigating Deformations on Full-Resolution*

Differential SAR Interferograms. Geoscience and Remote Sensing. 2004. vol. 42, no. 7, pp. 1377-1386.

[18] LANARI, R. - CASU, F. - MANZO, M. - ZENI, G. - BERARDINO, P. - MANUNTA, M. - PEPE, A. *An Overview of the Small Baseline Subset Algorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis*. Pure and Applied Geophysics. 2007. vol. 164, no. 4, pp. 637-661.

[19] LU, Z. - DZURISIN, D. *Recent Advances in InSAR Image Processing and Analysis*. In: *InSAR Imaging of Aleutian Volcanes*. Springer, 2014. pp. 35-48.

[20] LEŠKO, M. - PAPČO, J. - BAKOŇ, M. - LIŠČÁK, P. *Monitoring of Natural Hazards in Slovakia by Using of the Satellite Radar Interferometry*. Procedia Computer Science. 2018. vol. 138, pp. 374-381.

[21] MAZÚR, E. - LUKNIŠ, M. *Regionálne morfológické členenie, mapa 1:500 000*. 1980.

[22] ONDREJKA, P. - BAKOŇ, M. - PAPČO, J. - LIŠČÁK, P. - ŽILKA, A. *Monitoring aktivity zosuvného územia Prievidza-Hradec*. Geotechnika. 2016. no. 1, pp. 3-12.

[23] OSMANOGLU, B. - SUNAR, F. - WDOWINSKI, S. - CABRAL-CANO, E. *Time Series Analysis of InSAR Data: Methods and Trends*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. vol. 115, pp. 90-102.

[24] PERISSIN, D. *SARPROZ © The SAR PROcessing tool by periZ. Software Manual*. In: <https://www.sarproz.com/software-manual/>. 2009.

[25] PERISSIN, D. - WANG, T. *Repeat-Pass SAR Interferometry with Partially Coherent Targets*. Geoscience and Remote Sensing. 2012. vol. 50, no. 1, pp. 271-280.

[26] SAMIEIE-ESFAHANY, S. - HANSEN, R. - VAN THIENEN-VISSER, K. - MUNTENDA-BOSS, A. *On the Effect of Horizontal Deformation on InSAR Subsidence Estimates*. In: *Fringe Workshop 2009*. 2009. p. 7.

[27] TUTORIALSPOINT SIMPLY EASY LEARNING. *MATLAB Numerical Computing*. In: http://mayankagr.in/images/matlab_tutorial.pdf. 2014. p. 234.

[28] WERNER, C. - WEGMÜLLER, U. - STROZZI, T. - WIESMANN, A. *Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping*. Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2003. vol. 7, pp. 4362-4364.

*Daniela Piačková*¹

Study programme: Geodesy and Cartography, year of study: 3.

COMPUTATION OF THE TOPOGRAPHIC GRAVITATIONAL POTENTIAL OF ASTEROID (101955) BENNU IN TERMS OF THE SPHERICAL HARMONICS

VÝPOČET TOPOGRAFICKÉHO GRAVITAČNÉHO POTENCIÁLU ASTEROIDU (101955) BENNU VO FORME SFÉRIKÝCH HARMONICKÝCH FUNKCIÍ

Abstract

This article is focused on the spectral gravity forward modelling. We compute the topographic gravitational potential of asteroid (101955) Benu in spherical approximation as a spherical harmonic expansion of the potential into integer powers of the topography. We analyse behaviour of resulting potential depending on the individual integer powers p and their contributions to the potential. The understanding of the nonlinear relation between input topography and its implied gravitational effects is a first step prior to computing Benu's gravity effects in terms of spheroidal harmonics. Final topographic potential is computed up to the integer power $p = 20$ and maximum harmonic degree $n = 150$, since beyond that harmonic degree, numerical problems appear. The differences between our computation and the reference potential are at a level $\sim 10^{-10}$.

Key words

Gravity forward modelling; spectral domain; spherical harmonics; topographic gravitational potential of asteroid Benu

1. Introduction

The computation of topographic gravity effects is a process known as gravity forward modelling (GFM). It is based on the Newton's integral. The input is represented by some mass-density distribution which generates the gravity signal, e.g. it can be given through topographic mass models.

It is well-known that modelling of the gravitational effects of the topographic masses is relevant for many applications in geodesy and geophysics. It includes a predictions of gravity field in areas without or only with insufficient amount of observation, precise determination of the various functionals of the gravity field or geophysical studies of interior mass variations of the planets (e.g., [1], [2], [3], [4]).

This study is devoted to the gravity forward modelling in spectral domain and determination of the topographic potential of asteroid (101955) Benu. It is important to know the physical properties of such bodies and accurate model of their gravity field, since there are many efforts to observe potential threat they pose to Earth via missions which usually involve sending spacecraft onto their orbits [5].

¹ Daniela, Piačková, Ing., Department of Theoretical Geodesy, Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského 11, 81005 Bratislava

We choose the asteroid Bennu because of its nearly spheroidal shape what makes it a suitable object for future testing of the spectral GFM method in [6]. Furthermore, we work with model of topography of the asteroid with bandwidth limited to $n_{max} = 15$ making it less time-consuming in terms of computation. Particularly, we focus on the computation in spherical domain and use the spherical harmonics what can help us understand behaviour of gravity effects depending on the maximum degree of series expansion into integer powers of the topography.

Our results from spectral GFM are evaluated in form of gravitational potential of the whole Bennu's body. The reference data were provided by Blažej Bucha who determined gravitational potential generated by Bennu with 14–15 digits precision computed via method described in [7].

2. Theoretical Aspects of the Spectral Gravity Forward modelling

First of all, let us introduce an essential component of the spectral forward gravity modelling $H^{(p)}$ which expresses the topographic height functions (THF) of integer power p in the space domain. Dimensionless topographic height function represents ratio of the topographic height of p^{th} - power and some constant reference radius R , namely $H_{nm}^{(p)} = \frac{H_{nm}^p}{R^p}$ in the spectral domain. It can be expressed in spectral domain by spherical harmonic expansion to maximum harmonic degree $N_{max} = n_{max} \cdot p$ as [8]

$$H^{(p)} = \sum_{n=0}^{p n_{max}} \sum_{m=0}^n \left(\overline{HC}_{nm}^{(p)} \cos m\lambda + \overline{HS}_{nm}^{(p)} \sin \lambda \right) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi), \quad (1)$$

where λ is the longitude and φ is the geocentric latitude of the computation point, $\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$ are the fully normalized associated Legendre functions (ALFs) of harmonic degree n and order m , $(\overline{HC}, \overline{HS})_{nm}^{(p)}$ are the fully normalized spherical harmonic coefficients (SHCs) of the THFs of power p with the harmonic degree n and the harmonic order m . We use short-hand notation $H_{nm}^{(p)}$ for these coefficients in this article. The harmonic coefficients H_{nm}^p of individual power p are available from a spherical harmonic analysis of a global topography model.

It is known that relation between topography and its gravity is nonlinear (e.g. [9], [10], [11]), and so the topographic potential has to be expressed as a series expansion of integer powers p of the THFs. It means that $H_{nm}^{(p)}$ coefficients are used for calculation of the topographic gravitational potential coefficients V_{nm} as [8]

$$V_{nm} = \frac{1}{2n+1} \frac{4\pi R^3 \rho}{M} \sum_{p=1}^{p_{max}} \frac{\prod_{i=1}^p (n+4-i)}{p!(n+3)} H_{nm}^{(p)}, \quad (2)$$

where V_{nm} is short-hand notation for the spherical harmonic coefficients $(\overline{VC}, \overline{VS})_{nm}^p$ of the topographic potential, p_{max} is the maximum integer power of the series expansion, M is the mass of the planet, ρ is the density of the topographic masses, assumed to be constant for this study, and R is the radius of the reference sphere.

Any integer power p of a band-limited topography expanded to harmonic degree n contributes to the topographic potential up to degree $\cdot n$. If the power of topography H raises to infinity, the function covers the full spectrum, despite the original function was band limited [8]. The higher the resolution of the input topography n_{max} , the more integer powers p must be taken into account in Eq. (2) for convergence. The number of terms also increases with the range of the heights relative to the reference radius R [12].

Instead of calculating the sum from $p = 1$ to p_{max} in Eq. (2), we can evaluate the equation separately for the integer powers p . It gives us information about the contribution of individual powers of topography. It will be used in our numerical experiment.

3. Numerical Experiment

In this Section, we make spectral analysis of the THFs and the topographic potential. It means that we compute their dimensionless degree variances and we choose suitable n_{max} for calculation of the gravitational effects of Bennu's topography.

3.1 Spectral Analysis of the Topographic Height Functions

The dimensionless degree variances of the THFs can be computed as (e.g. [8], [13])

$$\sigma H_n^{(p)2} = \sum_{m=1}^n (\overline{HC}_{nm}^{(p)2} + \overline{HS}_{nm}^{(p)2}). \quad (3)$$

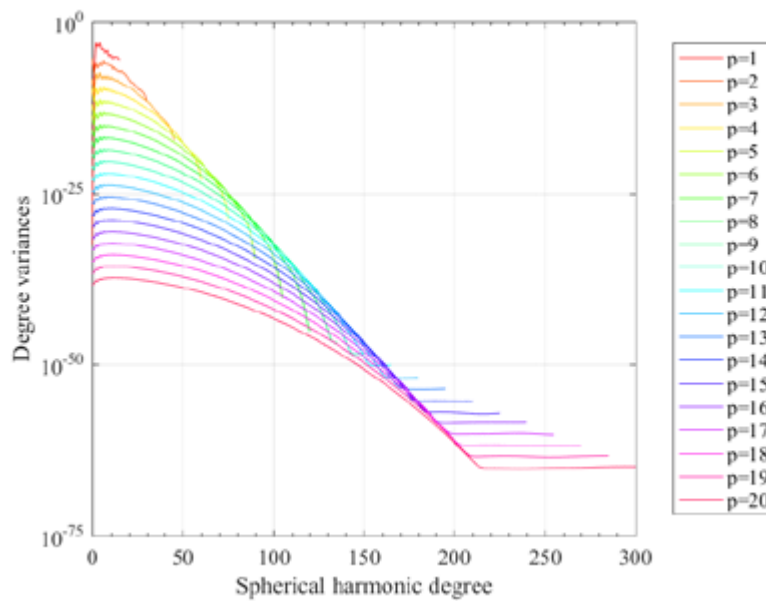


Figure 1: Degree variances of the topographic height function band limited to degree 15 for integer powers up to $p = 20$. (Degree variances are dimensionless.)

As it is apparent in Fig. 1, for the linear THF $H^{(1)}$, the spectrum is not smooth and it gradually decreases from degree 0 to degree 15. This behaviour is expected because of the limitation of the input topography bandwidth to only $n_{max} = 15$. The degree variances of THF $H^{(1)}$ for degree $n = 0$ reaches value at the level $\sim 10^{-33}$ what makes 25 orders difference between degree $n = 0$ and $n = 1$. It is connected with a general meaning of the harmonic coefficient C_{00} which describes body's center of mass (e.g. [14]). This property means that center of coordinate system is very close to the center of gravity of the asteroid Bennu (similar behavior will be also shown in potential degree variances). The curves of another integer powers of THFs get slowly smoother.

The spectrum of $H^{(2)}$ also gradually decays, but now in degree ranging [0 30]. It shows that the bandwidth is extended by factor 2 in comparison with input bandwidth. The same behavior is noticeable in the remaining functions. For the cubed THF $H^{(3)}$, spectral power is in band 0 to 45 (3 × the input bandwidth). Furthermore, the bandwidth increases with the integer power p with respect to the maximum harmonic degree of the input data ($n_{max} = 15$). Each THF $H^{(p)}$ of following integer power p is smaller in amplitude.

Roughly for $p \geq 9$, almost horizontal tails of the curves for last few harmonic degree n (increasing with the integer power p) is observable. They indicate that parts of the spectra were not recovered accurately via spherical harmonic analysis and synthesis. Based on this observation, we specify maximal harmonic degree of the expansion of the final topographic potential up to $N = 150$.

3.2 Spectral Analysis of the Topographic Potential

The dimensionless degree variances of the (single) contributions to the topographic potential model are expressed as (e.g. [8], [13])

$$\sigma V_n^{(p)2} = \sum_{m=1}^n (\overline{V C_{nm}^{(p)2}} + \overline{V S_{nm}^{(p)2}}). \quad (4)$$

We evaluate Eq. (2) separately to compute the contributions of individual the integer powers of the THFs to the topographic potential $V_{nm}^{(p)}$. These contributions are shown in Fig. 2, where also total topographic potential $V_{nm}^{p_{max}=20}$ (i.e. sum of the 20 contributions $V_{nm}^{(p)}$) is depicted.

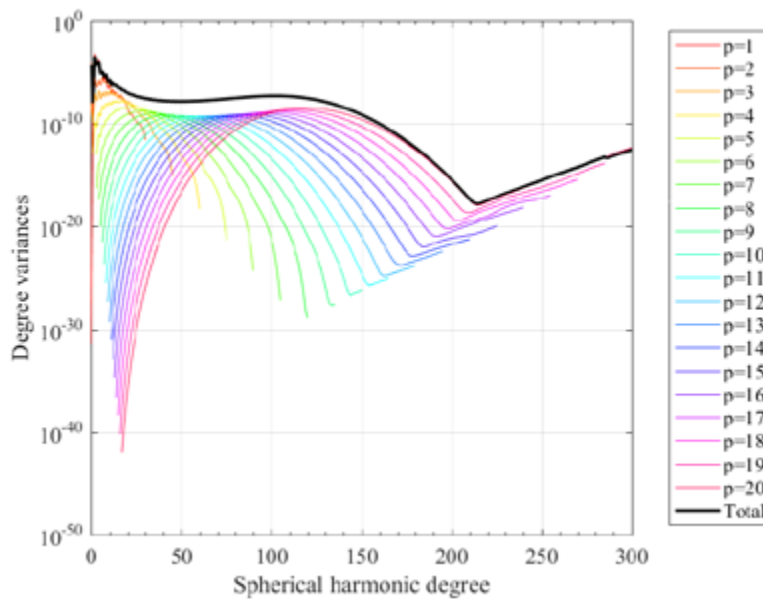


Figure 2: Potential degree variances of the contributions to the topographic potential made by integer powers of topographic height function band limited to degree 15 - contributions for integer powers of THF up to $p = 20$ and potential degree variances of the total (resulting) topographic potential (black line) are shown. (Degree variances are dimensionless.)

As apparent in Fig.2, contributions of $p = 1$ and $n = 0$ show very low value of degree variances – it is also connected with characteristics of the zero-degree harmonic coefficient. There is also a gap for low degrees of n in case of $p > 3$. It means that the integer power p contributes to the topographic potential from the harmonic degree $(p - 3)$ what is related to Eq. (2).

For degree variances of $p \geq 9$, the curve starts increasing sharply at the end of bandwidth (e.g. for $p = 10$, $n = 140$). “Hooks” at higher degrees represent numerical errors.

As expected, the contribution made by the integer power p has power only up to $n_{max} \cdot p$.

3.3 Gravitational Potential of the asteroid Bennu

Finally, we compute the topographic potential from the final V_{nm} SHCs ($p_{max} = 20$) by spherical harmonic synthesis at exactly the same computational points $P(\varphi, \lambda, r)$ as the reference values of the gravitational potential of the asteroid are given. The reference gravitational potential is given at the sphere with radius $R = 283$ m.

The topographic potential is computed up to harmonic degree $n = 150$, as mentioned in Section 3.1.

We can readily calculate total gravitational potential of Bennu in order to evaluate results from spectral GFM. To compute the Bennu's potential we determine gravitational potential generated by homogenous sphere with the radius of reference surface in GFM, i.e. $R = 245,284 \text{ m}$. This value is added to the topographic potential generated by topographic masses of the asteroid Bennu.

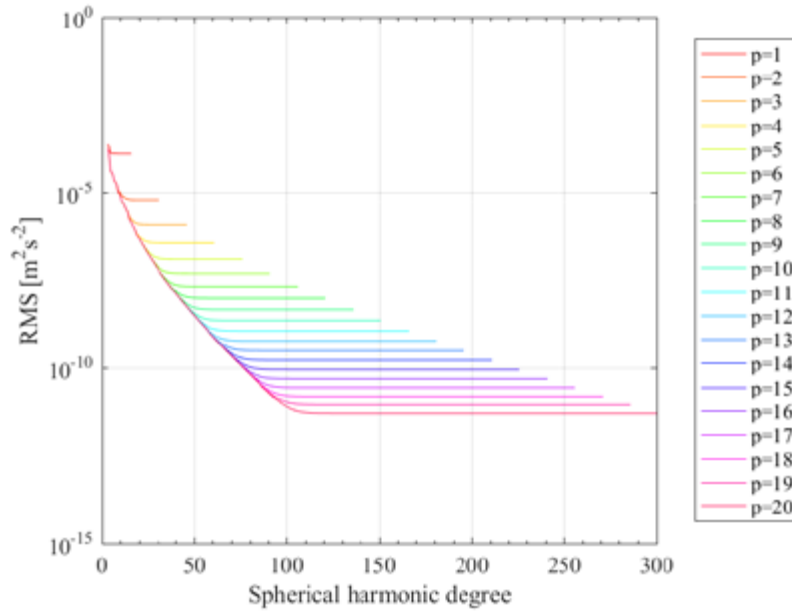


Figure 3: Root mean squares (RMS) of the differences between the reference gravitational potential of the asteroid Bennu and the results from spectral gravity forward modelling

We compute differences between our resulting gravitational potential of Bennu and its reference values. An evaluation for all used integer powers p of THFs in combination with n up to maximal possible harmonic degree $N = p_{max} \cdot n_{max}$ is made in terms of root mean squares (RMS) of differences in the potential (Fig. 3). Again, we see that the accuracy increases with used integer power p . Moreover, it is not necessary to compute the topographic potential up to maximal degree N , since computed RMS reached the lowest values significantly sooner. For integer power $p = 1$, the decay of RMS stops around harmonic degree $n = 5$. It means that only first five harmonic degrees of SHCs are necessary for determination of gravitational potential in case of linear THF. We assume that it is related to distance of computation point from body generating this potential (compare the radius of reference sphere $R = 254,284 \text{ m}$ versus the radius of sphere where we compute the gravitational potential).

In Fig. 4 the differences between reference values of the gravitational potential of the asteroid Bennu and our computation are shown. There is an agreement at the almost whole grid at level $\sim 10^{-12}$ and there are only few locations on the equator where differences are bigger (it is associated with the topography of the asteroid – there are the biggest terrain changes (Fig. 5).

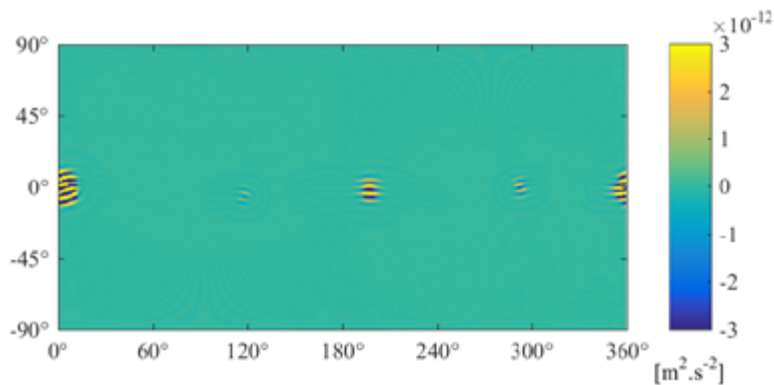


Figure 4: The differences between the reference gravitational potential of the asteroid Bennu and the results from spectral gravity forward modelling

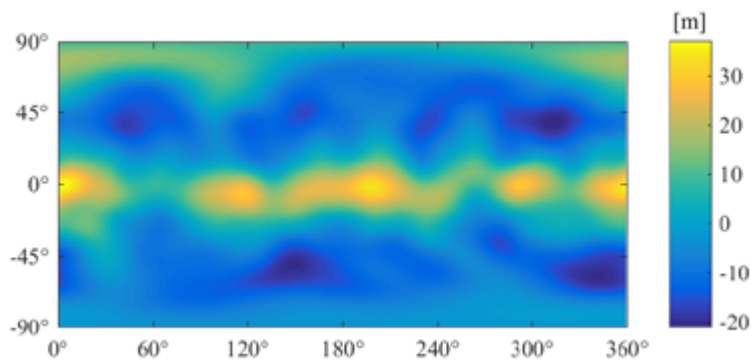


Figure 5: The topography of asteroid Bennu related to a reference sphere with a radius $R = 245.284 \text{ m}$

Acknowledgments

This work has been supported by the Slovak Grant Agency VEGA under project No.1/0750/18 and also by Young Researcher Support Program STU. Finally, I would like to thank Blažej Bucha for providing the values of reference gravitational potential of asteroid Bennu and also topography model of the asteroid.

References

- [1] FORSBERG, R and TSCHERNING, C.C.: The use of height data in gravity field approximation by collocation. *Journal Geophysical Research*. 1981, 86(B9): 7843–7854.
- [2] TZIAVOS, I. N. and SIDERIS, M. G.: Topographic reductions in gravity and geoid modelling. In *Lecture Notes in Earth System Sciences*, vol.110. Berlin Heidelberg: Springer, 2013 pp. 337–400.
- [3] WIECZOREK, M. A. and PHILLIPS, R. J.: Potential anomalies on the sphere: Applications to the thickness of the lunar crust, *Journal Geophysical Research*. 1998, 103(E1), 1715–1724, doi:10.1029/97JE03136.
- [4] BALMINO, G. et al.: Spherical harmonic modelling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies. *Journal of Geodesy*. 2012, 86(7), 499–520, doi:10.1007/s00190-011-0533-4.
- [5] TAKAHASHI, Y. and SCHEERES, D.J.: Small body surface gravity fields via spherical harmonic expansions. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2014, 119:169–206, doi:10.1007/s10569-014-9552-9.

- [6] PIAČKOVÁ, D.: Expansion of the topographic gravitation in spheroidal harmonics. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering: 28th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering*. ISBN 978-80-227-4864-3.
- [7] FUKUSHIMA, T.: Precise and Fast Computation of the Gravitational Field of a General Finite Body and Its Application to the Gravitational Study of Asteroid Eros. *The Astronomical Journal*. 2017, 154(4):145, doi: 10.3847/1538-3881/aa88b8.
- [8] HIRT, C. and KUHN, M.: Band-limited topographic mass distribution generates full-spectrum gravity field: Gravity forward modeling in the spectral and spatial domains revisited, *Journal Geophysical Research: Solid Earth*. 2014, 119, 3646–3661, doi:10.1002/2013JB010900.
- [9] RUMMEL, R. et al.: Comparisons of global topographic/isostatic models to the Earth's observed gravity field. *Rep. 388.*, 1988, Dep. of Geod. Sci. and Surv., Ohio State Univ., Columbus.
- [10] WIECZOREK, M.A.: Gravity and topography of the terrestrial planets, in *Treatise on Geophysics. Planets and Moons*. 2007, vol.10, pp. 165–206, Elsevier, Oxford, U. K.
- [11] HIRT, C. and Kuhn, M.: Evaluation of high-degree series expansions of the topographic potential to higher-order powers. *Journal Geophysical Research*. 2012, 117, B12407, doi:10.1029/2012JB009492.
- [12] CLAESSENS, S. J. and HIRT, C.: Ellipsoidal topographic potential—New solutions for spectral forward gravity modelling of topography with respect to a reference ellipsoid. *Journal Geophysical Research: Solid Earth*. 2013, 118, 5991–6002, doi:10.1002/2013JB010457.
- [13] HIRT, C. et al.: Topographic gravity modeling for global Bouguer maps to degree 2160: Validation of spectral and spatial domain forward modelling techniques at the 10 microGal level, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2016, 121, doi:10.1002/2016JB013249.
- [14] JEKELI, C.: *Potential Theory and Static Gravity Field of the Earth*. 2007, Elsevier, The Ohio State University, Columbus, OH, USA.

Filip Pružinec¹

Študijný program: Geodézia a kartografie, ročník: 2.

VOXEL-BASED SOLAR ILLUMINATION COMPUTATION OF FOREST REPRESENTED BY POINT CLOUD DATA

VÝPOČET OSVETLENIA LESNÉHO PORASTU REPREZENTOVANÉHO MRAČNOM BODOV POMOCOU VOXELOV

Abstract

The relationship between bark beetle forest infestation and solar radiation is statistically significant and therefore the correct solar radiation algorithm can help to address this issue. The solar illumination algorithm was proposed and implemented to compute the insolation of an area of interest in a certain period of time. This algorithm can be used to compute the most significant direct component of the solar radiation from the LiDAR point cloud data. The algorithm was implemented using Python programming language, pysolar library and python native multiprocessing package.

1. Introduction

This paper deals with the proposal and implementation of an algorithm for voxel based illumination computation of forest. The algorithm is a basis for solar radiation computation algorithm, that aims to improve predictive modelling of bark beetle forest infestation in Slovakia. As stated by [1], the relationship between bark beetle infestation and solar radiation is statistically significant and therefore correct solar radiation computation can help with decision making in taking measures against further forest devastation by the bark beetle. The global solar radiation has three components: direct (beam), diffuse and reflected radiation [2]. The direct radiation is the most significant component and can be computed using proposed illumination algorithm.

The forest is represented by LiDAR point cloud data. Presented algorithm converts point cloud data into voxel grid (3D raster) and finds the illuminated voxels based on the azimuth and altitude of the Sun in certain time. Implementation was realized in Python programming language with an objective to test and prepare core algorithm for 3D solar radiation computation plugin or toolbox for QGIS.

2. Methods

The proposed algorithm (Fig. 1) is based on two coordinate transformations. First step is to transform the point cloud from global coordinate reference system into local horizon and forming a local topocentric grid coordinate system. The second transformation is rotation of the topocentric system towards Sun's actual position using its azimuth and altitude. Assuming the parallel Sun rays and relatively small area of interest, points with same horizontal coordinates must be above each other and therefore the point with the highest vertical coordinate is illuminated, while the rest are in its shadow.

¹ Ing. Filip Pružinec, Slovak university of technology in Bratislava, Faculty of civil engineering

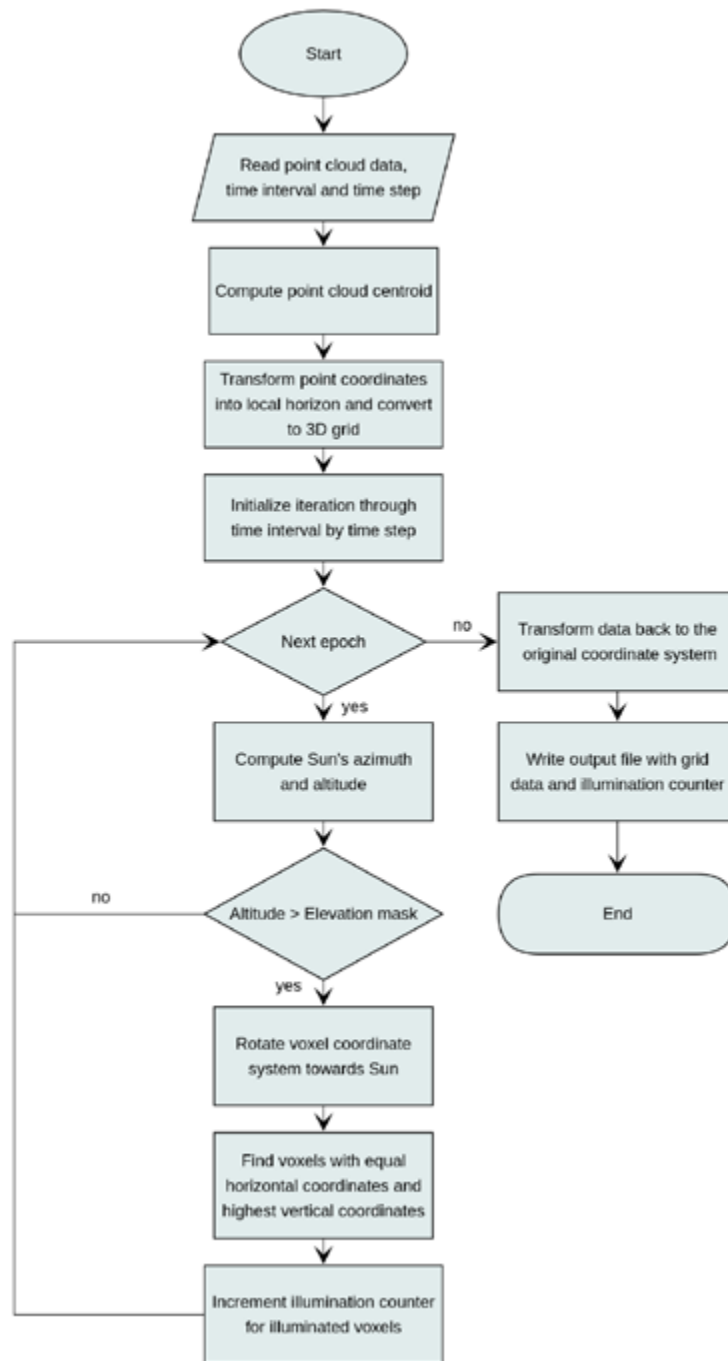


Fig. 1: Flowchart of the algorithm for voxel illumination computation

2.1. Solar illumination computation

Besides input point cloud data the 3D grid cell size, minimum Sun's elevation angle, time step and a time interval in which we compute the illumination is taken. From input point coordinates, centroid of the area of interest is computed. Centroid will be used to determine the Sun's position as well as the origin of local coordinate system in which the rest of the computation proceed. Input point coordinates are transformed into local horizon and then rounded according to the 3D grid cell size. Now the coordinates represent indices in local 3D grid with an origin in centroid of the area of interest. Iteration through time interval with a defined time step is initialized. Within every iteration, Sun's

azimuth and altitude angles are computed using current time. If the elevation of the Sun does not satisfy minimum elevation angle condition, iteration is skipped. In the next step, local grid coordinate system is rotated towards the Sun so that the vertical axis of the coordinate system is parallel with the Sun rays. Afterwards the coordinates are rounded. Illuminated voxels can be determined by grouping them by their horizontal coordinates and selecting those with the highest vertical coordinate. Rounding the coordinates after rotation results into grouping only voxels overlapping with more than half of their size. Selected illuminated voxels increment their illumination counter. Choosing the right voxel size is necessary, since the sub-voxel illumination is not evaluated. After finishing the iterative calculation, grid data is transformed back to the original coordinate system and written with additional attribute - illumination counter.

2.2. Implementation in Python

For implementation of the proposed algorithm, python programming language was used due to its efficiency in prototyping and broad support of scientific and mathematical tools. Since the vast majority of the computation represent iterative 3d vector operations, Numpy [3], SciPy [4] and Pandas [4] packages were used. Although Numpy was used to process the point cloud data, laspy [5] package was introduced for reading and writing the data and the metadata in las format. After reading the point cloud data, the centroid is calculated as a mean value of the point coordinates. Pyproj [6] package, which is an interface into well known cartographic projections and coordinate transformations library – PROJ [7], is used to transform the point cloud from input coordinate system into local horizontal system. Input spatial reference is taken from input file metadata. Since the area of interest is supposed to be relatively small a custom transverse mercator projection is used for the transformation. The iterative part of the computation is stateless and independent on its partial results, which allows it to be done in parallel. Python native multiprocessing package is used for parallelization, initializing an unordered loop over the specified time interval, directly summing the returning illumination counters from the spawned processes and dramatically increasing the efficiency of the computation. Every iteration starts with computation of Sun's azimuth and altitude angles using Jean Meeus algorithm that is described step by step in [8] and used in pysolar python package. Centroid position is used also to specify time zone. In the next step, if the minimum elevation condition is satisfied, using the Scipy rotation class, rotation matrices are calculated from the azimuth and altitude using Euler angles and applied on point vector. Rotated point vector is rounded and the voxels closest to the Sun are selected using Pandas dataframe group by and sort operation. Output las file is written with illumination counter stored under intensity attribute.

3. Results

The algorithm was used on point cloud data sample obtained via UAV LiDAR system VUX-SYS near Bezděz in Czech republic containing approximately 1.5 million points. After converting the data into grid with a cell size of 1 dm³ the amount was reduced to 0.85 million. End of July was chosen as a test date to compute single illumination at 13:10 with Sun's azimuth approximately 180° (Fig. 2).

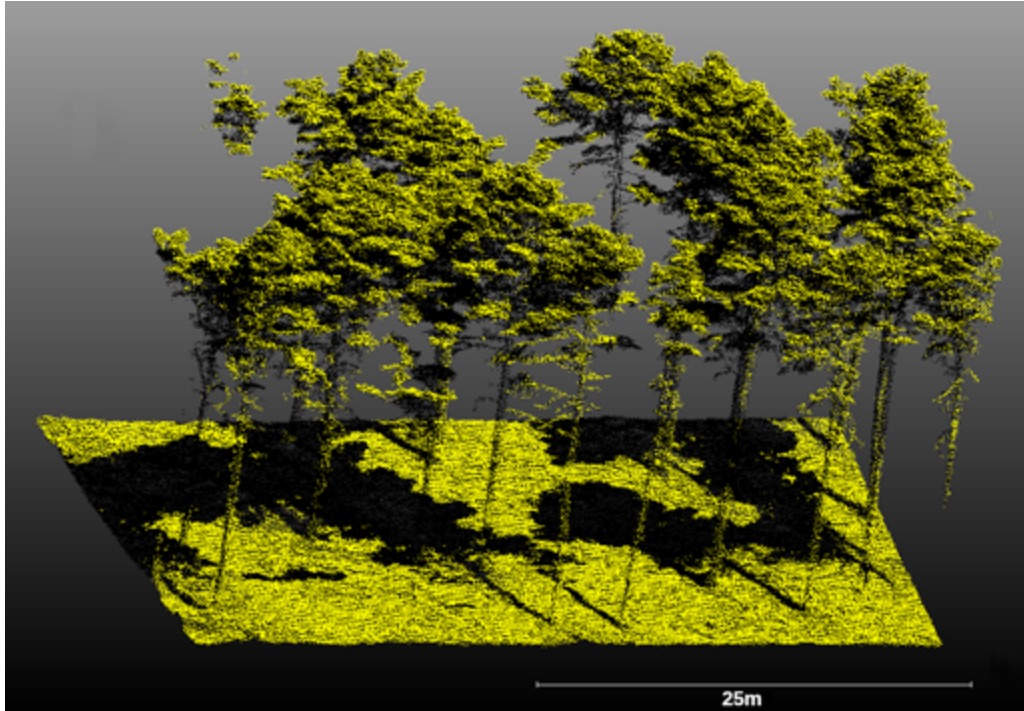


Fig. 2: Computed illumination for 31.7.2019 at 13:10 with Sun's azimuth approximately 180°

Visualizing the output file by intensity attribute that stores the illumination counter displays sharp shadows of the trees on the ground as well as insulated tree crowns. By extending the time interval from single epoch into 24 hours with an hour long time step, less sharp shadows are shown (*Fig. 3*). The computation time was measured using single thread and after introducing multithreading resulting into 2.5 - 3 times faster execution.

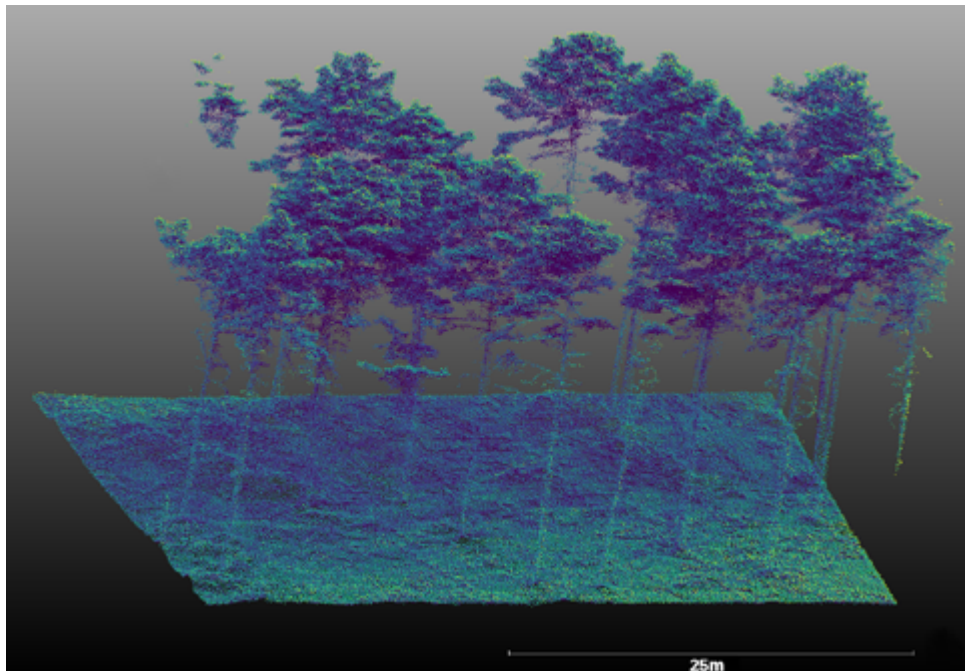


Fig. 3: Computed illumination for interval 31.7.2019 - 30.8.2019 with 1 hour time step

Histogram visualizing the illumination counter (*Fig. 4*) shows that during 24 hours approximately 30% of the points stays in shadow and 17% are insolated more than five times.

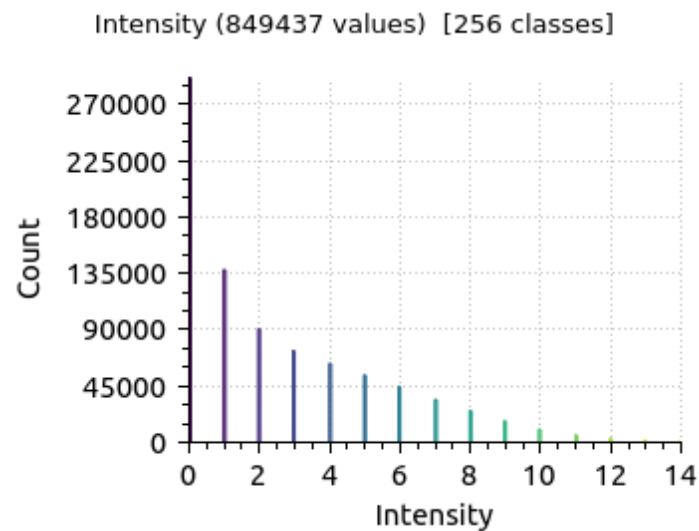


Fig. 4: Histogram of the number of insolations after 24 hours

Noticable difference in performance as a result of multithreading occurred during 365 day computation with the same one hour step finishing 3 - 3.5 times faster. The output file visualized (*Fig. 5*) shows smooth transitions between light and shadow.

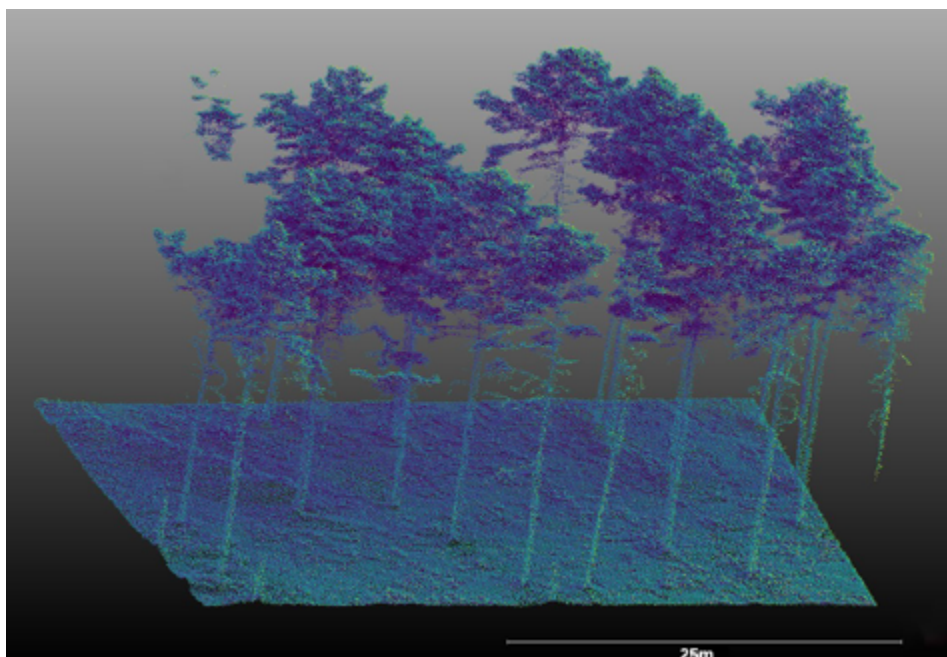


Fig. 5: Computed illumination for interval 31.7.2018 - 30.7.2019 with 1 hour time step

Majority of the shadowed voxels lie inside the crowns of the trees and under the trees on the ground northerly from their trunks.

4. Conclusion and discussion

Using the proposed algorithm, we are capable of computing the insolation of an area of interest using only LiDAR data. The LiDAR data does not even need to be classified, however, since the main objective of this algorithm is to compute solar radiation in order to prevent bark beetle infestation, the illumination of non tree voxels might not be interesting and therefore the point cloud should be classified. The proposed algorithm uses two transformations and grouping of the coordinates during an iterative computation that runs in parallel threads using multiprocessing. The result is a point cloud of voxel grid with an illumination counter stored as a property of the individual voxels and therefore can be easily visualized using existing tools. As shown in figures 2 and 5, in both single insolation and a year long isolation the inside of the tree crown is in shadow, which raises the question if it is even necessary to use these voxels in computation. Another question arising from the method of computation is the relationship between the centroid, that is used to determine all the parameters related to the position of the area on Earth's surface, and the maximum size of the area. In further research, this relationship needs to be determined and a method to slice larger areas into smaller blocks needs to be implemented. Also the relationship between the rounding of coordinates and resulting resolution needs to be studied, to allow sub-voxel illumination computation. The algorithm should be used in further research of bark beetle infestation and 3d solar radiation computation.

5. Acknowledgements

This work was supported by the grant no. 1/0300/19 of the Grant Agency of Slovak Republic VEGA.

References

- [1] MEZEI, P., JAKUŠ, R., BLAŽENEC, M., BELÁNOVÁ, S. and ŠMÍDT J. The relationship between potential solar radiation and spruce bark beetle catches in pheromone traps. *Ann. For. Res.*, vol. 55, no. 2, pp. 243–252, 2012.
- [2] HOFIERKA, J. and ZLOCHA, M. A New 3-D Solar Radiation Model for 3-D City Models. *Trans. GIS*, vol. 16, no. 5, pp. 681–690, 2012.
- [3] TRAVIS, E., OLIPHANT A guide to NumPy. *USA: Trelgol Publishing*. 2006.
- [4] JONES, E., OLIPHANT, T., PETERSON, P. et. al. SciPy: Open source scientific tools for Python. 2001.
- [5] BROWN, G., LasPy. 2017.
- [6] WHITAKER, J. PyProj. 2012 .
- [7] SHEKHAR, S. and XIONG, H. PROJ. *Encyclopedia of GIS*. Springer US, 2008, pp. 918–918.
- [8] REDA, I. and ANDREAS, A. Solar position algorithm for solar radiation applications. *Sol. Energy*, vol. 76, no. 5, pp. 577–589, Jan. 2004.

LANDSCAPING

František Cyprich¹

Študijný program: Krajinárstvo, 3. ročník

VYUŽITIE GRIDOVÝCH DATABÁZ PRI VODOHOSPODÁRSKYCH VÝPOČTOCH

USE OF GRID DATABASES IN WATER MANAGEMENT CALCULATIONS

Abstract

Water-economy calculations such as Precipitation-drain models provide a useful tool for practical solutions to various water-economic problems. These models mimic complex hydrological processes in nature. All models need to have enough time series of all necessary data from the area under investigation. In the post, we focus on the benefits of grid databases in such models. We examine the use of some freely available databases to calculate the flow rate in the TUV model for the selected basins. The results suggest that in some cases, the prediction of the flow rates with the grid databases is based on better than the measured data from the SHMU.

Kľúčové slová

TUV model, CarpatClim, ECA&D, CHIRPS, GLEAM

1. Úvod

Zrážkovo-odtokové (z-o) modely sú aplikované v simulačných úlohách a poskytujú užitočný nástroj pri praktických riešení rôznych vodo hospodárskych a inžinierskych problémov (napr. vplyv zmeny klímy na vodný režim, predpovedanie priebehu povodní, protipovodňová ochrana, atď.). Vo všeobecnosti, tieto modely napodobňujú zložité hydrologické procesy, ktoré prebiehajú v prírode. V simulovanom období môžu byť odlišné klimatické podmienky od kalibračných. Viacero autorov upozorňuje, že použitie takýchto modelov na rôznych miestach môže viesť k neistotám, ktoré ovplyvnia kvalitu výstupov, pretože sú tam často krát odlišné klimatické podmienky [1,2]. Mnoho prístupov ku komponentom z-o procesu, štruktúra skúmaného povodia, dostupnosť vstupných údajov, časové a priestorové rozdelenie, a pod. umožnili vznik veľkého množstva z-o modelov. V tomto príspevku skúmame využitie gridových databáz na výpočet a spresnenie povrchového odtoku v TUV modeli.

Pre potreby tejto práce je potreba zaviesť pojem celistvé a polo-rozčlenené modelovanie. Pri celistvom modelovaní je považované skúmané povodie za jeden celok, ktorý je reprezentovaný priemernými hodnotami vstupných údajov a fyzicko-geografických charakteristík povodia [3]. V súčasnosti je známe, že kvalita výstupov hydrologických modelov závisí najmä od kvality a dostupnosti vstupných údajov, od klimatického obdobia pre ktoré bol model vyvinutý, komplexnosti modelu a ďalších procesov [4].

V práci sme chceli zistiť prínos voľne dostupných gridových databáz (CarpatClim, ECA&D, CHIRPS a GLEAM) pri hydrologických výpočtoch.

¹ František, Cyprich, Ing., Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Materiál a metódy

2.1 Hydrologický model TUW

Pre modelovanie bol použitý koncepčný zrážkovo-odtokový model TUW („Technische Universität Wien“) [5]. Ide o tzv. koncepčný model s priestorovo sústredenou parametrizáciou. Model simuluje z-o proces kontinuálnym spôsobom v dvoch vzájomne prepojených fiktívnych nádržiach, ktoré znázorňujú základné akumulčné priestory v povodí. TUW model vychádza zo štruktúry švédskeho modelu HBV („Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning“) [6]. Model sa skladá z troch častí (submodelov): snehový, pôdny a odtokový. Úloha snehového submodelu spočíva v simulácii akumulácie a topenia snehu v povodí. Pôdny submodel obsahuje hydrofyzikálne parametre, ako napr. limit pre potenciálnu evapotranspiráciu (Lprät), pôdnu kapacitu (FC), parameter tvorby odtoku (BETA). Hlavnou úlohou pôdneho submodelu je simulácia procesov, ktoré prebiehajú pod zemským povrchom (vsakovanie zrážok a roztopeného snehu do pôdy). Odtokový submodel pozostáva z parametrov, ktoré sú zodpovedné za riadenie vzniku a priebehu povrchového a podpovrchového odtoku (k_0 , k_1 , k_2), základného odtoku (B_{max}), zásoby vody v pôde (L_{suz}), a tzv. parameter transformácie odtoku (Croute). Detailnejší opis štruktúry modelu, ako aj rozličné príklady jeho aplikácii je možné nájsť v početných prácach napr. [7,8]. Model sa skladá z 15 parametrov a pracuje so vstupnými dennými údajmi na celé povodie: priemerné zrážky, priemerná teplota vzduchu, priemerná potenciálna evapotranspirácia a priemerné prietoky v záverečnom profile povodia. Pre kalibráciu modelu boli vstupné údaje rozdelené na trénovacie a testovacie. Parametre boli optimalizované na základe Nash-Sutcliffovho koeficientu (NSE) [9].

2.2 Gridové databázy

Zaobstaranie dát bolo zamerané na klimatické a hydrologické údaje v dennom časovom kroku. Ide o série zrážok, priemerných teplôt, potenciálnej evapotranspirácie a prietokov. Údaje sú z SHMU, z databáz CarpatClim, ECA&D, CHIRPS a GLEAM. Od SHMU máme k dispozícii údaje o prietoku, priemernej teplote a zrážkach v dennom kroku. V nasledujúcom texte sú krátko charakterizované databázy a spôsob uchovávanía údajov v nich.

CarpatClim

Na zostavovaní databázy CarpatClim [10] spolupracovalo osem krajín a obsahuje údaje o 16 klimatických premenných. Pokrýva región Karpát a poskytuje údaje v denných, mesačných a ročných časových krokoch v období rokov 1961-2010. Gridové informácie sú k dispozícii v priestorovom rozsahu 44° N - 50° N -> 17° E - 27° E a v priestorovom rozlíšení $0,1^{\circ}$ x $0,1^{\circ}$.

ECA&D

ECA&D [11] v súčasnosti združuje 68 organizácií zo 63 krajín. Sieť monitorovacích staníc pozostáva z 10 596 nezávislých monitorovacích jednotiek (údaje od 14. 8. 2017) a pokrýva územie Európy a Stredomoria. Zaznamenáva 11 klimatických prvkov a taktiež poskytuje časové rady klimatických indexov a sumarizované informácie o extrémnych udalostiach, ktoré sa vyskytli počas sledovanej časovej periódy. Klimatické údaje sú poskytované v časovom rozmedzí rokov 1950 – 2019, v priestorovom rozsahu 25° N - 75° N -> 40° E - 75° E a v priestorovom rozlíšení $0,25^{\circ}$ x $0,25^{\circ}$ a $0,1^{\circ}$ x $0,1^{\circ}$.

CHIRPS

CHIRPS bol vyvinutý na podporu Agentúry Spojených štátov pre medzinárodný rozvoj systémov včasného varovania proti suchu (FEWS NET). Od roku 1999 vedci z USGS a CHC - podporovaní financovaním z USAID, NASA a NOAA - vyvinuli techniky na výrobu dažďových

máp, najmä v oblastiach, kde sú povrchové údaje riedke. Databáza poskytuje súbor údajov s viac ako 35 ročným radom od 1981 do súčasnosti. S priestorovým rozlíšením $0,05 \times 0,05^\circ$ v priestorovom rozsahu $50^\circ\text{N} - 50^\circ\text{S}$ a všetky zemepisné dĺžky.

GLEAM

The Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM) [12] je súbor algoritmov, ktoré odhadujú rôzne zložky evapotranspirácie na základe satelitných pozorovaní. Poskytujú údaje o evapotranspirácii a pôdnej vlhkosti od roku 1980 do 2018. Priestorové pokrytie je pre celý svet s priestorovým rozlíšením $0,25 \times 0,25^\circ$.

2.3 Skúmané územie

V práci sme zatiaľ skúmali jedno malé a veľké povodie popísané nižšie. Aby sme zistili, aký vplyv majú použité databázy a malé a veľké povodie. Rozdiel vybraných povodí okrem rozlohy a polohy je v tom, že v malom povodí sa nachádzajú len 3 body z gridových databáz a ostatné sú za hranicou povodia Obr. 1. Preto do výpočtov musíme zohľadniť body z okolia povodia. Vo veľkom povodí máme desiatky bodov Obr 2. a zatiaľ sme skúmali celé povodie ako jeden celok vo výpočtoch a robili sme priemery všetkých dostupných bodov v povodí a najbližšom okolí (0,7 násobok vzdialenosti bodov).

Povodie rieky Parná

Vodný tok Parná je tok na západnom Slovensku, je pravostranný prítok rieky Trnávky dlhý 38,5km. Pramení v Malých Karpatoch, v podcelku Pezinské Karpaty. Pred vodomernou stanicou má vodný tok Parná ľavostranný prítok toku Bohatá. Pod vodomernou stanicou je vodná nádrž Horné Orešany, ktorá bola dokončená v roku 1992. Vodná nádrž bola navrhnutá ako zdroj vody pre závlahu pozemkov pre okolité družstvá, na zabezpečenie biologického prietoku pod nádržou a transformovaním povodňových prietokov. ktorej prvoradým účelom je ochrana pred povodňami a zásobovanie vodou. V súčasnosti sa využíva však i na rybolov a v letnom období aj na kúpanie (na vlastné riziko) a vodné športy.

Prietoky na toku Parná v obci Horné Orešany sú zaznamenané vodomernou stanicou č. 5250. Hodnoty denných prietokov poskytol slovenský hydrometeorologický ústav (SHMU). Údaje sú k dispozícii od 1.1.1961 do 31.12.2010. Vodomerná stanica 5250 sa nachádza na súradniciach zemepisnej dĺžky 17,394 a zemepisnej šírky 48,470. Nadmorská výška hodnoty nuly na vodočtu je 234,7m n. m.. Plocha povodia k vodomernej stanici je $37,8 \text{ km}^2$.

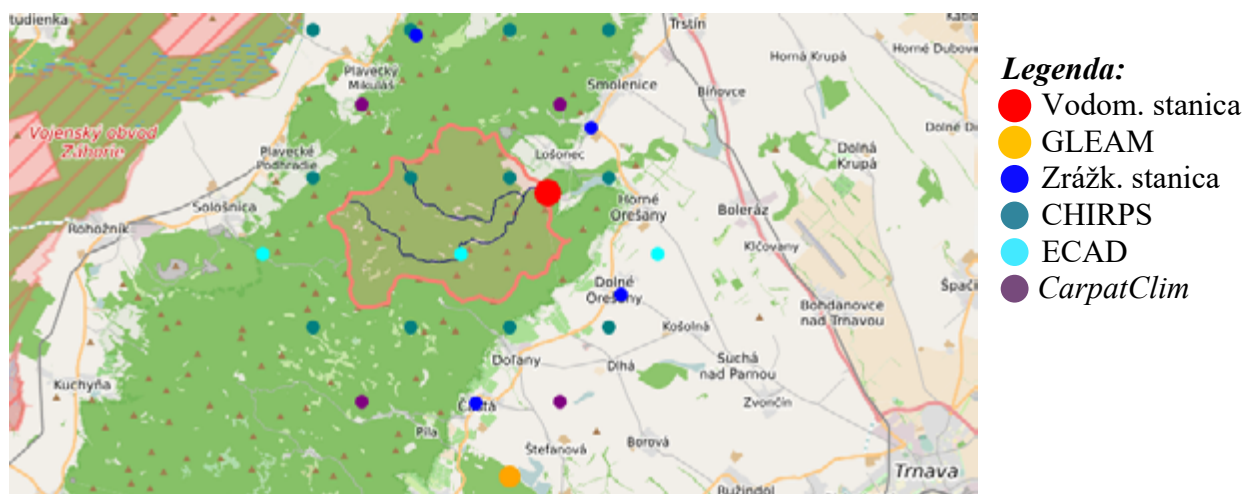


Figure 1: Pokrytie databáz v skúmanom povodí toku Parná.

Povodie rieky Hron

Vodný tok Hron je druhý najdlhší na Slovensku, pramení na strednom Slovensku, vlieva sa do rieky Dunaj, je dlhý 298 km. Prameň sa nachádza v Horehronskom podolí v území NAPANT.

Prietoky na toku Hron v obci Banská Bystrica sú zaznamenané vodomernou stanicou č. 7160. Hodnoty denných prietokov poskytol SHMU. Údaje sú k dispozícii od 1.1.1961 do 31.12.2010. Vodomerná stanica 7160 sa nachádza na súradniciach zemepisnej dĺžky 19,1399 a zemepisnej šírky 48,7312. Plocha povodia k vodomernej stanici je 1 766,7 km².

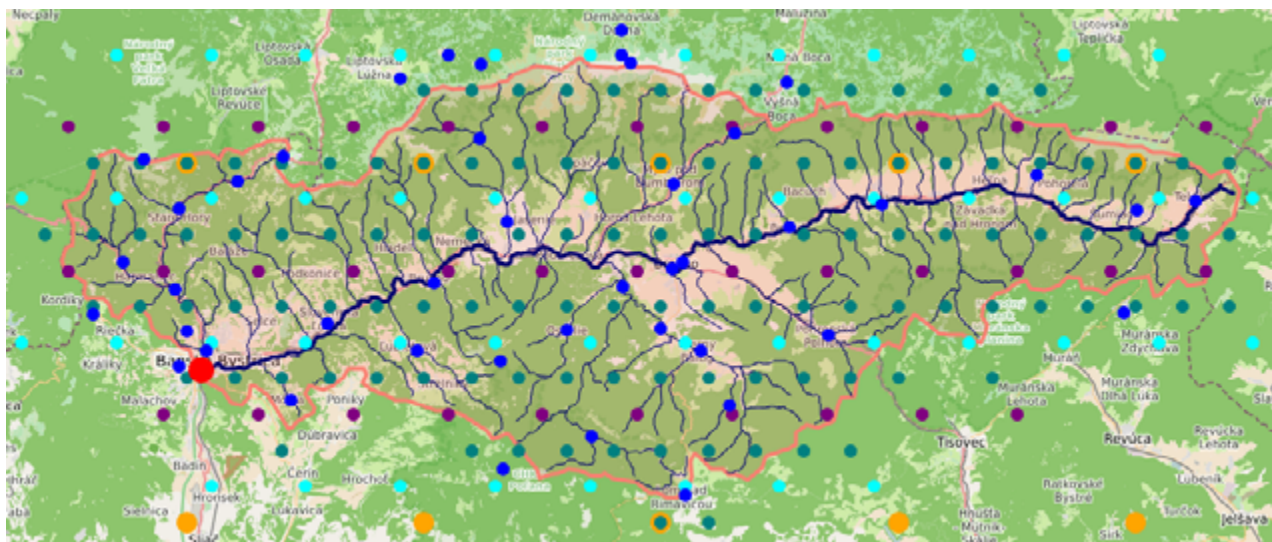


Figure 2: Pokrytie databáz v skúmanom povodí toku Hron.

3. Metódy

Pre výpočet prietokov bol použitý model TUW popísaný vyššie. Vstupy do modelu pozostávajú z dennej série zrážok, priemerných teplôt vzduchu, potenciálnej evapotranspirácie a prietokov. Má 15 parametrov, ktorých hodnoty sú potrebné na kalibráciu a boli hľadané pomocou genetického algoritmu. Optimalizácia bola realizovaná v softvéri R a jej výstupom je štatistika Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE). Výpočet potenciálnej evapotranspirácie sa uskutočnil s použitím vzorca navrhnutého Oudinom a kol. [13], ktorý je k dispozícii ako funkcia balíka airGR [14].

Pri simulácii pre Hron boli použité reálne 28-ročné rady denných hodnôt teplôt, zrážok, prietokov a evapotranspirácií za roky 1981-2008. Testovanie prebiehalo s údajmi pre roky 2001 – 2008, v kontexte tvorby modelu sa pracovalo s tréningovými údajmi z rokov 1981 – 2000. Pre vyhodnotenie extrapolácie údajov boli pri výpočte prietokov použité 34 variácií modelu líšiacich sa pôvodom jednotlivých vstupných údajov.

Pri simulácii pre Horné Orešany boli použité reálne 30-ročné rady denných hodnôt priemerných teplôt, zrážok, prietokov a potenciálnej evapotranspirácie za roky 1981-2008. Testovanie prebiehalo s údajmi pre roky 2006 – 2010, v kontexte tvorby modelu sa pracovalo s tréningovými údajmi z rokov 1980 – 2005. Pre vyhodnotenie extrapolácie údajov boli pri výpočte prietokov použité 8 variácií modelu líšiacich sa pôvodom jednotlivých vstupných údajov.

Zobrazené modely a pôvod vstupných hodnôt do modelov je zobrazený v tabuľke 1. Kvalita simulácií bola posudzovaná prostredníctvom nasledujúcich štatistických ukazovateľov presnosti: stredná kvadratická chyba (MSE), stredná priemerná kvadratická chyba (RMSE), koeficient Nash-Sutcliffe (NSE) a koeficient determinácie (R²).

Table 1: Pôvod vstupných hodnôt do TUW modelu.

| Povodie pre tok Hron | | | | Povodie pre tok Parná | | | |
|----------------------|-----------------------------|-------------|-------------|-----------------------|--------|------------|----------|
| model | zrážky | p. teplota | p. evap. | model | zrážky | p. teplota | p. evap. |
| 0 | SHMU | SHMU | SHMU | 0 | SHMU | SHMU | SHMU |
| 1 | ECA&D | ECA&D | ECA&D | 1 | ECA&D | ECA&D | GLEAM |
| 2 | CarpatClime | CarpatClime | CarpatClime | 2 | ECA&D | SHMU | SHMU |
| 4 | Priemer z gridových databáz | | | 3 | SHMU | ECA&D | SHMU |
| 11 | CarpatClime | SHMU | CarpatClime | 4 | SHMU | SHMU | GLEAM |
| 12 | CHIRPS | SHMU | GLEAM | 5 | ECA&D | ECA&D | SHMU |
| 23 | SHMU | CarpatClime | SHMU | 6 | SHMU | ECA&D | GLEAM |
| 28 | Priem. GD. | SHMU | SHMU | 7 | ECA&D | SHMU | GLEAM |

4. Výsledky

Extrapolácia dát z databáz prebehla v softvéri R. Výpočtovému procesu predchádzala kontrola úplnosti dát, pričom sa zistilo, že pre povodie toku Hron chýbali údaje pre niektoré dni, ktoré sa vylúčili z výpočtov. Následne sa vypočítala potenciálna evapotranspirácia použitím vzorca navrhnutého Oudinom a kol. a urobili sa priemery z bodov gridových databáz. Pre overenie vypočítaných hodnôt bol použitý koncepčný hydrologický model TUW a parametre zisťované a kalibrované pomocou genetického algoritmu. Po dokončení procesu kalibrácie a predpovede prietokov boli výsledky porovnávané pomocou testovacích údajov (1995-2010) a presnosť vyjadrená koeficientom Nash-Sutcliffe a ďalšími v Tab. 2 a 3.

Model 0 je smerodajný výsledok, ktorý vyšiel z údajov od SHMU. Najlepšie vychádzajúce modely sú zobrazené v Tab. 1 a výsledky sú v Tab.,2 a 3. Modely sa uskutočnili dokopy 42 krát. Rozdiely medzi nimi boli vo vstupných údajoch, ktoré sú podrobnejšie špecifikované v časti "Materiál a metódy" a Tab. 1. Porovnanie presnosti jednotlivých modelov TUW (Tab. 2 a 3) prekvapujúco ukazuje, že v jednom prípade pre obe povodia sa zlepšila predikcia prietokov oproti údajom SHMU. Pre povodie toku Parná je to v prípade nahradenia údajov zrážok zo zrážkomerných staníc SHMU za údaje z databázy ECAD. A pre povodie toku Hron je to v prípade nahradenia údajov zrážok z SHMU za údaje z databázy CHIRPS a z vypočítaných potenciálnych evapotransp. z SHMU dát za pot. evapotransp.z databázy GLEAM. Niektoré iné kombinácie vstupných údajov sa presnosťou približujú k modelu 0.

Table 2: Výsledky modelov pre povodie toku Parná.

| model | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| NSE | 0.66 | 0.63 | 0.78 | 0.61 | 0.29 | 0.65 | 0.24 | 0.66 |
| ME | 0.1 | 0.08 | 0.04 | 0.1 | 0.23 | 0.05 | 0.23 | 0.08 |
| RMSE | 0.34 | 0.36 | 0.28 | 0.37 | 0.5 | 0.35 | 0.52 | 0.35 |
| NRMSE % | 58.2 | 60.5 | 46.7 | 62.4 | 84.2 | 59.4 | 87.2 | 58.4 |
| PBIAS % | 25.8 | 21 | 11.2 | 26.8 | 58.9 | 14 | 59.6 | 20.2 |
| rSD | 1.18 | 1.17 | 0.96 | 1.22 | 1.34 | 1.16 | 1.37 | 1.13 |
| r | 0.88 | 0.86 | 0.89 | 0.87 | 0.83 | 0.86 | 0.83 | 0.86 |
| R2 | 0.78 | 0.75 | 0.79 | 0.76 | 0.7 | 0.74 | 0.68 | 0.75 |

Table 3: Výsledky modelov pre povodie toku Hron.

| model | 0 | 1 | 2 | 4 | 11 | 12 | 23 | 28 |
|----------------|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|
| <i>NSE</i> | 0.70 | 0.65 | 0.68 | 0.62 | 0.72 | 0.44 | 0.65 | 0.65 |
| <i>ME</i> | 0.11 | -0.08 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.15 | -0.08 | -0.08 |
| <i>RMSE</i> | 0.47 | 0.51 | 0.49 | 0.53 | 0.46 | 0.65 | 0.51 | 0.51 |
| <i>NRMSE %</i> | 54.5 | 59.1 | 56.9 | 61.3 | 52.9 | 74.5 | 59.1 | 58.9 |
| <i>PBIAS %</i> | 10.3 | -7.7 | 2.9 | 3.8 | 4.1 | 14.6 | -7.6 | -7.1 |
| <i>rSD</i> | 0.95 | 0.83 | 0.97 | 0.99 | 0.9 | 1.03 | 0.83 | 0.82 |
| <i>r</i> | 0.85 | 0.81 | 0.83 | 0.81 | 0.85 | 0.75 | 0.81 | 0.81 |
| <i>R2</i> | 0.73 | 0.66 | 0.69 | 0.66 | 0.72 | 0.56 | 0.66 | 0.66 |

* Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Mean error (ME), Root Mean Square Error (RMSE), Normalized Root Mean Squared Error (nRMSE%), Percent Bias (PBIAS%), Ratio of Standard Deviations (rSD), Pearson Correlation coefficient (r), R squared (R2).

5. Záver

Cieľom článku bolo navrhnúť a otestovať možnosti použitia gridových databáz vo vodohospodárskych výpočtoch použitím zrážkovo odtokového TUV modelu. V článku popisovaná metóda je založená na potrebných vstupných údajoch a parametroch. Smerodajné vstupné údaje sú od SHMU. Údaje z gridových databáz (*CarpatClim*, *ECA&D*, *CHIRPS* a *GLEAM*) ktoré boli použité ako náhrada vstupných údajov SHMU do výpočtov prietokov v spomínanom modeli. Modely, v ktorých boli použité niektoré vstupné údaje z iných databáz majú lepšie výsledky ako len z databázy SHMU. V modeli pre povodie toku Parná je lepšia predikcia prietokov s použitím zrážok z databázy *ECA&D* a údajov: teploty a evapotranspirácie z SHMU. V modeli pre povodie toku Hron je lepšia predikcia prietokov s použitím zrážok a evapotranspirácie z databázy *CarpatClim* a údajov o teplote z SHMU. V ďalších modeloch so vstupnými údajmi z iných databáz sa približuje predikcia prietokov k predikcii z údajov od SHMU.

Zistenia tejto práce predstavujú uspokojivý výsledok. Overenie využiteľnosti výsledkov prostredníctvom koncepčného hydrologického TUV modelu dokázalo, že niektoré kombinácie databáz dosahujú pri modelovaní zrážkovo-odtokového procesu porovnateľné výsledky ako model založený na reálne nameraných dátach. Hoci toto testovanie bolo trochu obmedzené a je potrebné ho vykonať na viacerých miestach, tieto výsledky sú veľmi sľubné. Po takomto testovaní by klimatické údaje z gridových databáz mohli vhodne doplniť existujúcu databázu a slúžiť ako zdroj údajov, napríklad pre budúce štúdie vodného hospodárstva.

Pod'akovanie

Článok vznikol vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja. A vďaka podpore projektu VEGA: 1/0665/15 Analýza klimatických a hydrologických extrémov metódami data miningu a inými nástrojmi hydroinformatiky z pohľadu adaptačných opatrení v krajine.

Literatúra

- [1] Oudin, L., et al.: Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency at the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*. 2006, roč. 320, č. 1-2, s. 8-16. ISSN 0022-1694.
- [2] Saft, M., et al.: Bias in streamflow projections due to climate induced shifts in catchment response. *Geophysical Research Letters*. 2016, roč. 43, č. 14, s. 1574-1581. ISSN 1944-8007
- [3] Jeníček, M.: Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích, In Langhammer, J., Vliv změn přírodního prostředí povodí a údolní nivy na povodňové riziko, PŘF UK, 2005. Praha, 112-126.
- [4] Coron, L., et al.: On the lack of robustness of hydrologic models regarding water balance simulation: a diagnostic approach applied to three models of increasing complexity on 20 mountainous catchments. *Hydrol. Earth. Sci.* 2014, roč. 18, č. 2, s. 727-746. ISSN 1027-5606
- [5] Viglione, A. and Parajka, J.: TUWmodel: Lumped hydrological model for educational purposes, R package version 0.1-4, 2014
- [6] Bergström, S.: The HBV model. *Computer models of watershed hydrology*. *Water. Resour.* 1995, s. 443-476.
- [7] Parajka, J., Merz, R. and Blöschl, G.: Uncertainty and multiple calibration in regional water balance modelling case study in 320 Austrian catchments. *Hydrol. Process.* 2007, roč. 21, č. 4, 435 – 446. ISSN 0885-6087.
- [8] Sleziak, P., et al.: The impact of the variability of precipitation and temperatures on the efficiency of a conceptual rainfall-runoff model. In: *Slovak Journal of Civil Engineering*. Bratislava: STU, 2016, s. 1 – 7.
- [9] Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V.: River flow forecasting through conceptual models, part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 1970, roč. 10, č. 3, 282 – 290. ISSN 0022-1694.
- [10] CARPATCLIM Database © European Commission - JRC, 2013. Available from: <http://www.carpatclim-eu.org/pages/home/> [accessed Sep. 25. 2019].
- [11] European Climate Assessment & Dataset project, Available from: <https://www.ecad.eu> [accessed Sep. 25. 2019].
- [12] Martens, B., et al.: GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geoscientific Model Development*. 2017, roč. 10, č. 5, 1903–1925. ISSN 1991-959X.
- [13] Oudin, L., Michel, C. and Anctil, F., Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 1 - Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs, *Journal of Hydrology*. 2005, roč. 303, č. 1-4, 275-289. ISSN 0022-1694.
- [14] Coron, L., et al.: The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R package. *Environmental Modelling and Software*. 2017, roč. 94, s. 166-171. ISSN 1364-8152.

Gréta Doláková¹

Študijný program: Krajinárstvo, 2.

MODELOVANIE KVALITY AKVATICKÉHO HABITATU

MODELLING OF THE STREAM HABITAT QUALITY

Abstract

The study aims at the aquatic habitat quality modelling of the Area Weighted Suitability (AWS) of the reaches based on the IFIM methodology, in the piedmont streams using bioindication by the brown trout (*Salmo trutta m. fario*). For modelling procedure and preparation of data, the Hydrocheck software and Computer Software SEFA was used. The study was conducted in Slovak piedmont streams. For comprehensive description of modelling, particularly the only one section was herein described, located in the Nitra basin. Topographic and hydrometric measurements have been performed respectively for the natural and regulated reach. From the results, it can be concluded, that regulated reaches are considerably qualitatively affected by anthropogenic influence. On the contrary, the natural channel presents more suitable habitat that preserves the aquatic ecosystem of the stream.

Kľúčové slová

IFIM, SEFA, vhodnostné krivky, bioindikácia, akvatický habitat, Pstruh potočný, vodný manažment

1. Úvod

Medzi najvýznamnejšie krajinotvorné prvky patria vodné toky, ktoré sú v súčasnosti najviac ohrozené a modifikované antropologickou činnosťou v medziach ich kvality a formy. Význam tokov je nenahraditeľný. Vodný tok je zložitý systém s funkciou zavlažovania a vyživovania okolitej krajiny, ktorou preteká a s ktorou je vo vzájomných interakciách. Riečne systémy významne súvisia s povodím, jeho geologickou stavbou a štádiom reliéfného vývoja, vytvárajúc riečnu sieť stekajúcou povrchovou a podzemnou vodou [1]. Takýto ekosystém, predstavuje funkčnú jednotku pozostávajúcu z daného prostredia, biotop a organizmy, ktoré v ňom žijú sú známe ako biocenóza. Akvatický ekosystém v dobrej kondícii môže slúžiť početným funkciám, ako sú produkcia, regulácia, protipovodňová ochrana a pozitívny kultúrny dopad [2]. Napriec históriou ľudského vývoja rieky podliehali ľudským aktivitám, ktoré zmenili prietokový režim, ako sú potreby na poľnohospodárske zavlažovanie, konštrukcie vodných elektrární, vodné plavby, pitné účely, ale aj klimatické zmeny, invázivne druhy a mnohé ďalšie zásahy do tvarov a funkcie koryt a ako dôsledok je stav celosvetovej akvatickej biodiverzity mnohonásobne horší, ako v iných ekosystémoch [3]–[5]. Od čias priemyselnej revolúcie podliehajú rieky, ovzdušie a oceány výraznému znečisteniu a klimatickým zmenám. Riečne korytá navyše trpeli aj necitlivými úpravami, vo väčšine orientovaných na protipovodňovú ochranu, avšak častokrát výhradne zameraných na zvýšenie kapacity koryta, prehĺbenie toku, napriamenie a odrezávanie meandrov bohatých na biodiverzitu a geomorfologickú členitosť. Vo väčšine prípadov regulované toky plnia iba protipovodňovú funkciu, no neprinášajú žiadnu hodnotu urbanizovanému prostrediu [6]. Bohatá pestrosť dna tak potrebná pre riečnu faunu a flóru, a tým aj pre samočistiacu schopnosť toku, bola často vymenená za betónové panely, ktoré v mnohých riekach pretrvávajú dodnes. Betónové panely

¹ Gréta Doláková, Ing.

Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra vodného hospodárstva krajiny
Radlinského 11, blok C, 12. posch., 810 05 Bratislava, info@kvhk.sk

zamedzujú variabilnej geomorfológii koryta, tým zanikajú úkryty pre ryby a voda sa rýchlejšie zohrieva. Za hrubé a necitlivé úpravy korýt sú zodpovedné najmä prvotné pokusy o vodný manažment v priebehu minulých storočí, ktoré boli ovplyvnené antropocentrickým vnímaním sveta [7]. Len pomerne nedávno si vodohospodárski odborníci začali uvedomovať komplexné mechanizmy fungujúce v tak dynamickom prostredí, ktoré sú dokázané viacerými konceptami a snahou o integrovaný prístup k manažmentu vodných zdrojov [8]. Podľa toho, akvatické prostredie je komplexný systém zvyčajne ovplyvňovaný a tvorený prietokom, živinami, sedimentami, a viacerými dynamickými hydraulickými premennými, ktoré vytvárajú neustále sa časovo a priestorovo meniace kontinuum. Je známe, že akvatické ekosystémy, ako potoky, rieky, mokrade, jazerá, ústia alebo moria sú štruktúrované interakciou fyzikálnych, chemických a biologických procesov vo viacnásobnej prelínajúcej sa miere, kde sa variácie vyskytujú v rámci sekúnd alebo ročných obmien [9]. Je preto potrebný veľmi komplexný pohľad na opísanie takého zložitého prostredia. Akvatické organizmy všetkého druhu, ktoré obývajú a tvoria riečne spoločenstvá, si už v priebehu evolúcie vyvinuli adaptácie na zotrvanie v tak dynamickom prostredí. No adaptácie na tak rýchle a drastické zmeny v ich priestore za posledné stáročia, ako znečistenie a štruktúrnu modifikáciu spôsobenú antropologickou činnosťou a klimatickými zmenami, si ešte vyvinúť nestihli. Takýto dopad môže pozmeniť výskyt a správanie jednotlivých druhov, prispieť k ich poklesu alebo dokonca lokálnemu vyhubeniu [10]. Na poskytnutie ochrany a zamedzeniu masového vymierania druhov, je v prvom rade potrebné stanoviť morfológické, hydrologické, hydrobiologické limity na návrh vhodných úprav tokov podľa správnych zásad krajinného plánovania. Táto štúdia sa zameriava na vplyv dopadu zmeny morfológie koryta na preferencie a výskyt rýb špecifických pre oblasť Slovenska. Ryby ako bioindikátor boli vybrané preto, že sú vhodné na hodnotenie ekologickej integrity riek, pre ich citlivosť na zmeny v riečnom habitate, výskyt, dlhovekosť a mobilitu [11], [12]. Zmena morfológie koryta a s tým aj rýchlejšie zohrievanie vody je pre ryby významným ohrozením, nakoľko sú to ektotermické živočíchy, čo znamená že ich fyziologické zdroje tepla sú malého alebo až zanedbateľného významu pri kontrole teploty tela, také organizmy preto vo väčšej miere spoliehajú na teplotu prostredia [13]. Z tohto dôvodu sú ryby fyziologicky veľmi naviazané na lokálne klimatické podmienky, ktoré môžu eliminovať ich odolnosť a toleranciu na klimatické a antropologické zmeny [14]. Existuje veľké množstvo postupov na posúdenie následkov zmien vo vodných tokoch, no kľúčovým aspektom je posúdiť a identifikovať vzťahy medzi biologickými a fyzikálnymi zložkami [15]. Na posúdenie tak komplexného systému je potrebný interdisciplinárny prístup, ktorý v nedávnej minulosti viedol ku vzniku novej vednej disciplíny, Ekohydrauliky. Aj táto štúdia sa pohybuje v intenciách ekohydrauliky, ktorá predstavuje adekvátne a interdisciplinárne modelovanie a hodnotenie súčasného stavu riek a návrhu revitalizačných opatrení a techník, za účelom zmiernenia antropogénneho dopadu [8]. Pre analýzu tohto typu sú najvhodnejšie modely založené na Prírastkovej metodike prúdenia v toku - Instream Flow Incremental Methodology (IFIM), na základe ktorej bolo prevádzané modelovanie aj v tejto štúdií.

2. Materiál a metódy

Rôznorodá geomorfológia toku a v nej existujúcich mikrohabitatov je rozhodujúcim faktorom pre zachovanie počtu a biodiverzity organizmov v období maximálnej záťaže, minimálnych prietokov v letnom období. Vyjadrenie mikrohabitatov malým počtom priečných profilov v úseku je značne vzdialené od reality. Miera spoľahlivosti vyhodnotenia je úzko spätá s veľkosťou vstupného súboru a preto na zodpovedné zameranie bolo použitých od 9 do 11 priečných profilov pre každý referenčný úsek na 1D modelovanie. Na modelovanie boli vybrané toky Handlovka, Lehotský potok, Teplica a Štiavnica, pre každú lokalitu úseky prirodzeného a upraveného koryta. Pre túto štúdiu bol vybraný a opísaný tok Handlovky, pričom ostatné úseky podstúpili rovnakú

procedúru modelovania. Jednorozmerné modeli sú vhodné na modelovanie vo väčších mierkach, na regionalizáciu, alebo generalizáciu údajov pre ďalší výskum [16] a sú zamerané na vyjadrenie prietoku a základné abiotické podmienky mikrohabitatov. Čo je v prípade tejto štúdie vyhovujúce, pretože sa zameriava na generalizáciu a zjednodušenie metodiky hodnotenia tokov. Pre rybie preferencie habitatov nie je rozhodujúca profilová rýchlosť, ale lokálne podmienky napríklad v oblasti výmoľu, tône, prúdového tieňa alebo iných prekážok. K takejto charakteristike sú potrebné hydrometricky namerané zvislicové rýchlosti a hĺbka vody. Topografia úseku bola zameraná niveláciou po jednotlivých priečných profiloch. Výsledkom tohto zamerania je súbor priečných profilov, ktorý sa modeluje v 1D projekcii. Úseky boli zamerané v období jún – august 2018. Terénne merania boli realizované Leica FlexLine TS02 Total Station s východiskovými bodmi polohového poľa zameranými s GNSS Leica Viva (anténa GS15 a ovládač CS15), v súradnicovom systéme Slovenskej jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej (SJTSK). Na základe získaných skúseností z vyhodnotenia sa bude pokračovať v meraniach pre ďalšie referenčné úseky.

2.1 Územie štúdie

Cieľové územie v každej lokalite boli prirodzené a upravené úseky. Horské a podhorské slovenské toky majú viacero podobných a spoločných charakteristík a preto aj podobný negatívny vplyv úprav na ich kvalitu. Z tohto dôvodu a na základe získaných meraní a výsledkov sa javí priestor na tvorbu korelačných rovníc, ktoré majú v budúcnosti potenciál na zjednodušenie metodiky hodnotenia stavu ekologickej kvality podhorských a horských tokov za účelom naplnenia cieľov RSV 2000/60/ES (s oficiálnym názvom Smernica 2000/60/ES Európskeho parlamentu a Rady z 23. októbra 2000, ktorou sa stanovuje rámec pôsobnosti pre opatrenia Spoločenstva v oblasti vodného hospodárstva). Za účelom meraní bol medzi ostatnými vybraný aj tok Handlovka. Handlovka je rieka na strednom Slovensku, v okrese Prievidza. Je ľavostranným prítokom Nitry, má dĺžku 32 km a zaberá povodie s veľkosťou 178,3 km². Je tokom IV. rádu a priemerná lesnatosť povodia je 40 %. Pramení v pohorí Vtáčnik pod vrchom Biely kameň (1 135,0 m n. m.) v nadmorskej výške približne 770 m. Handlovka ústi do Nitry medzi obcami Koš, Opatovce nad Nitrou a mestom Nováky (časť Laskár). Hydrometrické a topografické zameranie morfológie prirodzeného referenčného úseku toku Handlovka (18,88 r.km - 18,998 r.km) bolo zamerané dňa 19. júna 2018 nad obcou Handlová pod obcou Ráztočno. Neďaleko sa nachádza športové ihrisko, obrábaná pôda, cestná komunikácia a v priamej blízkosti brehy obrastené hustou vegetáciou. Upravený úsek bol zameraný v ten istý deň a bolo taktiež vykonané hydrometrické a topografické zameranie morfológie upraveného referenčného úseku toku Handlovka (23,671 r.km - 23,788 r.km), v obci Handlová. Referenčný úsek sa nachádza uprostred zastavaného mestského územia, v krátkej blízkosti sa nachádza železničná trať a banícky podnik Hornonitrianske bane. Tok má charakter typického upraveného toku, tvar koryta lichobežníkového tvaru a napriamená trasa toku len s miernym zakrivením, brehy boli zastúpené pokosenou trávnatou vegetáciou a miestami spevnené kamennou stenou. Tok sa prirodzenou činnosťou skrutkového pohybu vody v miestach zakrivenia na konvexnom brehu zanáša a vznikajú lavice zarastené nízkou vegetáciou. Referenčný úsek obsahuje aj niekoľko priečných stupňov.

2.2 Hydrometrické a topografické zameranie

Meranie prietoku hydrometrovaním patrí medzi základné terénne práce v praxi vodného hospodárstva a na základe jeho výsledkov sa skonstruovali merné krivky, ktoré definujú vzťah medzi prietokom a vodným stavom v jednotlivých profiloch. Na meranie prietoku sa použili meracie zariadenia hydrometrické vrtule na bodové meranie rýchlostí, z ktorých sa určil rýchlostný profil. Norma MŽP SR OTN ŽP 3108 odporúča merania 2 až 3 bodové pri hĺbkach väčších ako tri

priemery vrtule a menších ako 3 metre [17]. Meralo sa v 3 bodoch, 3 rôznymi vrtuľami, v najnižšom bode typ 1V120, v strednom bode typ V(101-1) a v hornom bode typ 1V192, za pomoci kalibračných konštánt (α , β) a času $T = 30s$. Celkový prietok v prirodzenom úseku bol vypočítaný na $Q_{HAN_PRIR} = 0,198982 \text{ m}^3/s$ a celkový prietok na upravenom úseku bol $Q_{HAN_UPR} = 0,20652 \text{ m}^3/s$.

Topografické merania boli vykonané na zameranie priečných profilov do jednotlivých osobitých pozdĺžnych profilov. Prirodzený referenčný úsek sa nameralo v dĺžke 118m v 11 priečných profiloch a v každom priečnom profile sa nameralo 7 bodov nadmorskej výšky dna od seba rovnomerne vzdialených. Upravený úsek sa nameralo v dĺžke 117m v 9 priečných profiloch a v každom priečnom profile sa nameralo 8-12 bodov nadmorskej výšky dna. Medzi zaznačené body patrili aj nadmorská výška najhlbšieho dna a úrovne hladiny. Na obrázkoch nižšie sú zaznamenané situácie úsekov a znázornené jednotlivé priečne profily merania.

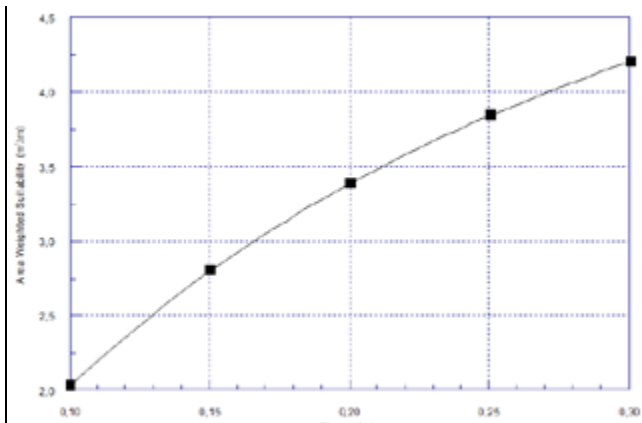
2.3 Modelovanie toku

Začiatko modelovania, bolo spracovanie topografických dát (.*frt* – výstupný súbor z totálnej stanice Leica FlexLine TS02) z terénnych meraní pomocou softvéru Hydrocheck, v ktorom sa namodelovali pozdĺžne a priečne profily, situáciu aj s rovnomerným ustáleným prúdením a simulácia rýchlostného pola. V nasledujúcom kroku sa vo forme výstupu (.*hif* výstupný súbor z Hydrochecku) prekonvertovali dáta do vstupného súboru (.*xlsx* – vstupného excelovského súboru) do modelovacieho softvéru SEFA. V SEFA boli nasledovne podrobne namodelované drsnosti, kalibrácia rýchlostí a vyobrazené pozdĺžne a priečne profily. Pri toku Handlovka boli ešte použité aj modelové hodnoty rýchlostného pola, pri ďalších referenčných úsekoch ďalších tokov (Lehotský potok, Teplica, Štiavnica) neboli zahrnuté, nakoľko sa skúša teória zovšeobecnenia a zjednodušenia metodiky postupu a teda výpočet len s jedným parametrom, hĺbkou vody. V tretom kroku boli do SEFA vložené zovšeobecnené vhodnostné krivky pre pstruha potočného na horské a podhorské slovenské toky [18], pri priemernej hĺbke:

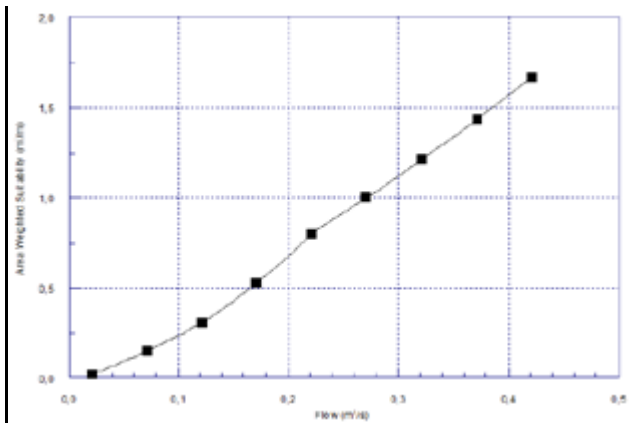
- prirodzeného toku Handlovka 22,15cm, boli vybraté vhodnostné krivky pre hĺbku vodného stĺpca 20-30cm
- pri priemernej hĺbke upraveného úseku toku Handlovka 10,95cm, boli vybraté vhodnostné krivky pre hĺbku vodného stĺpca 0-20cm

3. Výsledky

Na záver bola zobrazená celková Vážená využitelná plocha (VVP)/Area Weighted Suitability (AWS) zahŕňajúca dva parametre hĺbku a rýchlosť spolu s vhodnostnými krivkami pstruha potočného. Výsledky ukazujú viditeľné rozdiely medzi prirodzeným a regulovaným úsekom toku, v prospech prirodzeného úseku. Hodnoty AWS boli nasledovné, AWS na prirodzenom úseku s hodnotou $Q=0,199 \text{ m}^3/s$ bolo $AWS=3,376$. Na upravenom úseku pre nameraný prietok s hodnotou $Q=0,206 \text{ m}^3/s$ bolo $AWS= 0,719$. Grafy obsahujú aj namerané hodnoty modelových prietokov. Prirodzený úsek podľa výsledkov ponúka vhodnejšie prostredie pre pstruha potočného než upravený.



Obrázok 1 Hodnoty AWS pre prirodzený úsek



Obrázok 2 Hodnoty AWS pre upravený úsek

4. Diskusia a záver

Ochrana biodiverzity je často limitovaná financovaním, preto musí podstúpiť rozdeleniu identifikovaním priorit a tým prejsť k efektívnemu prerozdeleniu finančných zdrojov [19]. Charakteristiky, ktoré ovplyvňujú rybí výskyt a ich odolnosť voči rôznym vplyvom sa považujú za nádejný zdroj informácií na hodnotenie ich ohrozenia a návrh revitalizačných opatrení. Tieto charakteristiky reprezentujú každé morfológické, fyziologické alebo fenologické vlastnosti, ktoré sa dajú zmerať vzhľadom na rôzne druhy rýb [20]. Tento výskum je však limitovaný nerovnomerným zastúpením dát a ich kvalitou [14]. Preto je dôležité vylepšiť a zjednodušiť metodiku na ohodnotenie geomorfológie súčasného stavu riek a jej vplyv na výskyt a citlivosť rybných druhov na základne jasných kvantitatívnych a konzistentných kritérií [21] a tým sprístupniť návrh nápravných alebo zmierňujúcich opatrení širšej verejnosti. Habitat je priestor vody, ktorý je obývaný komunitami organizmov, ktoré sú závislé na interakcii medzi nimi a interakcii s prostredím. Interdisciplinárny prístup zohľadnený v princípoch ekohydrauliky doposiaľ najvernejšie vykresľuje reálne deje a závislosti abiotických a biotických faktorov v priestore toku. Ekohydraulika sa špecificky zaoberá hydraulickým inžinierstvom, geomorfológiou a ich vplyvom na akvatické ekosystémy a holistické prístupy riešení [22]. Na základe takéhoto prístupu je možné navrhovať zodpovedné revitalizačné opatrenia, ktoré zapadnú do prostredia a budú mať vyššiu šancu na úspech. Metodika IFIM s prístupným prevedením v softvéri SEFA kvantifikuje biotické zmeny v toku na základe abiotických parametrov, a tým umožňuje zodpovedné ohodnotenie kvality akvatického habitatu podľa RSV 2000/60/ES a návrh úspešných revitalizačných opatrení. Limity súčasných európskych vedeckých štúdií na túto problematiku a komplexné hodnotenie ležia v nedostatku informácií o jednotlivých druhoch, nerovnomerných dátach a ich kvalite [14] aj preto, táto sféra predstavuje vysoký potenciál na výskum. Kvalita akvatického habitatu sa dá špecifikovať množstvom mikrohabitatov a úkrytov vhodných pre daný druh ryby, ktoré vytvárajú vhodnú váženú využiteľnú plochu (VVP). Aj keď modelovanie na základe charakteristík bioindikátorov nie je univerzálne riešenie na tak komplexný problém, ako je kvalita riečného ekosystému, je to významný posun vpred v oblasti interdisciplinárneho prístupu návrhu revitalizačných opatrení. Ďalší výskum bude zameraný na vytvorenie metodiky hodnotenia kvality tokov v súlade s RSV 2000/60/ES a terénne merania budú zamerané na verifikáciu korelačných rovníc pre VVP (AWS) a tiež určenie miery vhodnosti pre päť kvalitatívnych tried kvality. Získané informácie by mali byť stabilnou vstupnou informáciou pre podrobnejšie hodnotenie kvality akvatického habitatu a následne optimálny návrh revitalizačných opatrení.

Pod'akovanie

Článok vznikol vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja a projektu VEGA 1/0068/19.

Literatúra

- [1] I. Macura, V., Stankoci, “Modelovanie biologických podmienok toku v súlade s Rámcovou smernicou EÚ o vode”, s. 131–133, 2013.
- [2] C. Brachet *et al.*, *the Handbook for Management and Restoration of Aquatic Ecosystems*, č. March. 2015.
- [3] A. K. Carlson, W. W. Taylor, K. M. Schlee, T. G. Zorn, a D. M. Infante, “Projected impacts of climate change on stream salmonids with implications for resilience-based management”, *Ecol. Freshw. Fish*, roč. 26, č. 2, s. 190–204, apr. 2017.
- [4] Q. Guo, X. Liu, X. Ao, J. Qin, X. Wu, a S. Ouyang, “Fish diversity in the middle and lower reaches of the Ganjiang River of China: Threats and conservation”, *PLoS One*, roč. 13, č. 11, s. e0205116, nov. 2018.
- [5] C. Revenga, J. Brunner, N. Henninger, K. Kassem, a R. Payne, “Pilot analysis of global ecosystems: freshwater systems.”, *Pilot Anal. Glob. Ecosyst. Freshw. Syst.*, roč. 2001305512, č. 1569734607, 2000.
- [6] Z. Štefunková, A. Škrinár, I. Belčáková, P. Halaj, a P. Ivan, “Determination of the Qualitative Features of Watercourses for Restoration in the Urban Environment”, *Procedia Eng.*, roč. 161, s. 23–29, 2016.
- [7] H. H. G. Savenije, A. Y. Hoekstra, a P. van der Zaag, “Evolving water science in the Anthropocene”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, roč. 18, č. 1, s. 319–332, jan. 2014.
- [8] I. Maddock, A. Harby, P. Kemp, a P. Wood, *Ecohydraulics: An Integrated Approach*. 2013.
- [9] D. C. Dauwalter, D. K. Splinter, W. L. Fisher, a R. A. Marston, “Geomorphology and stream habitat relationships with smallmouth bass (*Micropterus dolomieu*) abundance at multiple spatial scales in eastern Oklahoma”, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, roč. 64, č. 8, s. 1116–1129, aug. 2007.
- [10] D. Ayllón, S. F. Railsback, S. Vincenzi, J. Groeneveld, A. Almodóvar, a V. Grimm, “InSTREAM-Gen: Modelling eco-evolutionary dynamics of trout populations under anthropogenic environmental change”, *Ecol. Modell.*, roč. 326, s. 36–53, apr. 2016.
- [11] V. Macura, Z. S. Štefunková, M. Majorošová, P. Halaj, a A. Škrinár, “Influence of discharge on fish habitat suitability curves in mountain watercourses in IFIM methodology”, *J. Hydrol. Hydromechanics*, roč. 66, č. 1, s. 12–22, 2018.
- [12] E. R. Keeley, S. O. Campbell, a A. E. Kohler, “Bioenergetic calculations evaluate changes to habitat quality for salmonid fishes in streams treated with salmon carcass analog”, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, roč. 73, č. 5, s. 819–831, máj. 2016.
- [13] A. Kovacevic, G. Latombe, a S. L. Chown, “Rate dynamics of ectotherm responses to thermal stress”, *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, roč. 286, č. 1902, s. 20190174, máj. 2019.
- [14] I. Jarić, R. J. Lennox, G. Kalinkat, G. Cvijanović, a J. Radinger, “Susceptibility of European freshwater fish to climate change: Species profiling based on life-history and environmental characteristics”, *Glob. Chang. Biol.*, roč. 25, č. 2, s. 448–458, feb. 2019.
- [15] J. Conallin, E. Boegh, a J. K. Jensen, “Instream physical habitat modelling types: An analysis as stream hydromorphological modelling tools for EU water resource managers”, *Int. J. River Basin Manag.*, 2010.
- [16] A. Škrinár, *Vplyv abiotických faktorov na hydrobiológiu toku*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2011.
- [17] V. Mosný, *Hydrologia. Morfológia povodia a prietoky*. STU Bratislava, 2002.
- [18] Z. Štefunková *et al.*, “The Impact of The Morphology of Mountain Watercourses on The

Habitat Preferences Indicated by Ichthyofauna Using the IFIM Methodology”, *Appl. Ecol. Environ. Res.*, roč. 16, č. 5, s. 5893–5907, 2018.

- [19] E. McDonald-Madden, I. Chadès, M. A. McCarthy, M. Linkie, a H. P. Possingham, “Allocating conservation resources between areas where persistence of a species is uncertain”, *Ecol. Appl.*, roč. 21, č. 3, s. 844–858, apr. 2011.
- [20] S. R. Floeter, M. G. Bender, A. C. Siqueira, a P. F. Cowman, “Phylogenetic perspectives on reef fish functional traits”, *Biol. Rev.*, roč. 93, č. 1, s. 131–151, feb. 2018.
- [21] N. Trull, M. Böhm, a J. Carr, “Patterns and biases of climate change threats in the IUCN Red List”, *Conserv. Biol.*, roč. 32, č. 1, s. 135–147, feb. 2018.
- [22] P. J. Wood, D. M. Hannah, a J. P. Sadler, *Hydroecology and ecohydrology : past, present and future*. Wiley, 2007.

Zuzana Némětová¹

Študijný program: Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, ročník: štvrtý

CALIBRATION PROCEDURE OF THE PHYSICALLY-BASED EROSION-2D MODEL UNDER RAINFALL SIMULATIONS IN THE CZECH REPUBLIC

Proces kalibrácie fyzikálne-založeného Erosion-2D modelu na základe dažďových simulácií v Českej Republike

Abstract

The aim of the article lies in the calibration of infiltration submodule of the physically-based Erosion-2D model. Erosion-2D model consists of two submodels; i.e. infiltration submodel and erosion submodel but the calibration of infiltration submodule represents the first step to be performed before the calibration of the erosion model. The infiltration process is affected by many different factors changing in the space and time, i.e. soil compaction, soil crusting, surface soil pores or biological activity but the physically based soil erosion models consider homogenous soil matrix and does not take into account the processes mention above. That's why it is necessary to include some correcting parameter and therefore involve the impacts in the model calculation. In the physically-based Erosion model is the correcting parameter called Skinfactor which reduces the prediction error resulting from the simplified assumptions of the model. Because the Skinfactor is empirically derived from rainfall simulations, calibration of Skinfactor was based on the 141 rainfall simulation experiments. The Skinfactor behaviour together with the complex dataset of Skinfactor values for different combinations of crops, management of crops, stage of crops growth, soil properties and initial moisture conditions represents the most important results of whole calibration process. The main purpose of Skinfactor values database is to provide the tool for proper application of the model in the Czech and Slovak condition.

Keywords: infiltration, soil erosion, physically-based model, Erosion-3D model, rainfall simulation, initial moisture, Skinfactor

1 Introduction

Soil water erosion strongly stimulated by human activities represents the most dominant problem worldwide [1] and is responsible for the greatest soil losses in Europe. Because the modelling of soil water erosion has a long history, it is not surprising that a huge number of water erosion models have been developed in order to find a way to prevent, reduce and decrease further development of erosion processes. The major problem of all models developed lies in their calibration, validation and verification which has been found especially in the case of soil water erosion because a terrain field measurement of soil erosion intensity is very financially and technically demanding. A partial solution can be covered by using rainfall simulators as a significant tool offering essential data necessary and irrecoverable for the calibration and validation processes of all mathematical models [2]. Rainfall simulators are possible to adjust the intensity and duration of the rainfall events and quantify soil losses on various types of soil, various slope conditions, and land cover types [3], [4].

Because there are a lot of model limitations, input and output data limitations, not clear knowledge of basin characteristics or insufficiently clear mathematical structure of the models used calibration of the models represents highly demanding and complex process [5].

Among many ways of model calibration a comparison between observed and simulated data is considered as the simplest and most frequented calibration procedure method [6]. An essential part of a model calibration is to obtain input and output variables for initial conditions that are known as well as sufficient knowledge of the model equations. [7].

The aim of the article represent the part of the calibration of the physically and event-based Erosion-2D model. The calibration procedure is based on the 141 field rainfall simulations performed in the village Puclice in the Plzen Region of the Czech Republic. The field terrain measurements were done for two variants of soil condition, i.e. natural state and fully saturated state under various crops, stage growth of crops, management of crops and different soil initial moisture conditions as well. The main purpose of whole calibration process lies in the creation of dataset of Skinfactor values for the conditions described above. The results were statistically analysed in order to quantify dependence between Skinfactor and other variables and to derive reliable transfer functions.

2 Methodology and input data

2.1 Erosion-2D model

The concept used in EROSION-2D has been developed by [8] at the Department of Geography at the Free University of Berlin and this approach was implemented in model which simulates soil erosion on a slope profile. The application of physically and event-based Erosion-2D model include not only the predicting the amount of soil loss on agricultural land but also calculating the surface runoff resulting from extreme rainfall events, and assessing the effects of different agricultural management practices on the generation of surface runoff [9].

The main structure of EROSION-2D is following:

1. An erosion model which describes detachment of soil particles, their transport and deposition
2. An infiltration model where by the [10] is used in order to describe the process of infiltration.
3. Green and Ampt method is based on the assumption that soil is regarded as a homogeneous structure of tiny capillary tubes irregular in area, direction and shape.

Because the article is about calibration of infiltration module only the infiltration module is described.

2.2 Model of infiltration

The infiltration approach is based on the simplified assumption of a rigid and homogeneous soil matrix and uses high spatial and temporal resolution of an infiltration processes (Schmidt, 1993). It is well known that the process of infiltration is affected by many different factors changing in space and time and that's why some simplifications have to be included in the model calculations in order to describe the complicated process of infiltration.

In order to mathematically describe the infiltration process, the gravitational component i_1 and the dynamic component of the matrix i_2 is considered.

The gravitational potential is defined as a function of the gravitational component (i_1):

$$i_1 = k \cdot \frac{\Delta\psi_g}{x_{f1}} = k \cdot g \quad (1)$$

where:

- i_1 infiltration rate of gravitational component [kg/(m² s)]
- k hydraulic conductivity of transport zone [(kg s)/m³]
- $\Delta\psi_g$ gravitational potential [(N m)/kg]
- x_{f1} the depth of the wetting front of the gravitational component [m]
- g gravitational constant [m/s²]

The matrix potential (matrix potential) ψ_m is described by the matrix component i_2 :

$$i_2 = k \cdot \frac{\Delta\psi_m}{x_{f2}(t)} \quad (2)$$

where:

- i_2 infiltration rate of matrix component [kg/(m² s)]
- k hydraulic conductivity of transport zone [(kg s)/m³]
- $\Delta\psi_m$ matrix potential [(N m)/kg]
- $x_{f2}(t)$ the depth of the wetting front of the gravitational component [m] in time t

The saturated hydraulic conductivity is defined by an empirical equation according to [11] and depends on soil structure, soil texture and the presence of macrospores. In the model is described as follows:

$$k_s = 4 \cdot 10^{-3} \cdot (1.3 \cdot 10^{-3} / \rho_b)^{1.3b} \cdot \exp(-0.069 T - 0.037 U) \quad (3)$$

$$b = (10^{-3} \cdot D) - 0.5 + 0.2 \cdot \delta p \quad (4)$$

where:

- k_s saturated hydraulic conductivity [kg*s/m³]
- ρ_b bulk density [kg/m³]
- T clay content [kg/kg]
- U silt content [kg/kg]
- b skinfactor [-]
- D average particle size [m]
- Δp standard deviation [-]

2.3 Description of study area

Investigated area is located in the small village Pučlice situated in the Domažlice district in the Plzeň Region of the Czech Republic (Figure 1). Total size of investigated area covers 13.84 km² with the average elevation 398 m a.s.l. The soil textural structure of the study area is following: 11.2 % clay, 51.3 % silt and 37.5 % sand and the dominant soil type represents sandy loamy soils. The bulk density reaches values between 1240 – 1768 kg/m³ and the organic matter content ranges from 1.22 to 2.16 %. For the rainfall simulation experiments following agrotechnology were used: Conventional, Mustard without barrel, Mustard vertical processing, Ryegrass, Peas without barrel, Peas vertical processing, Phacelia without barrel, Phacelia vertical processing and following crops were simulated: Seedbed, Maize, Broad bean, Panicgrass, Sunflower, Flax, Wheat, White mustard, Peas, Barley, Reygrass, Lupine, Purple tansy.

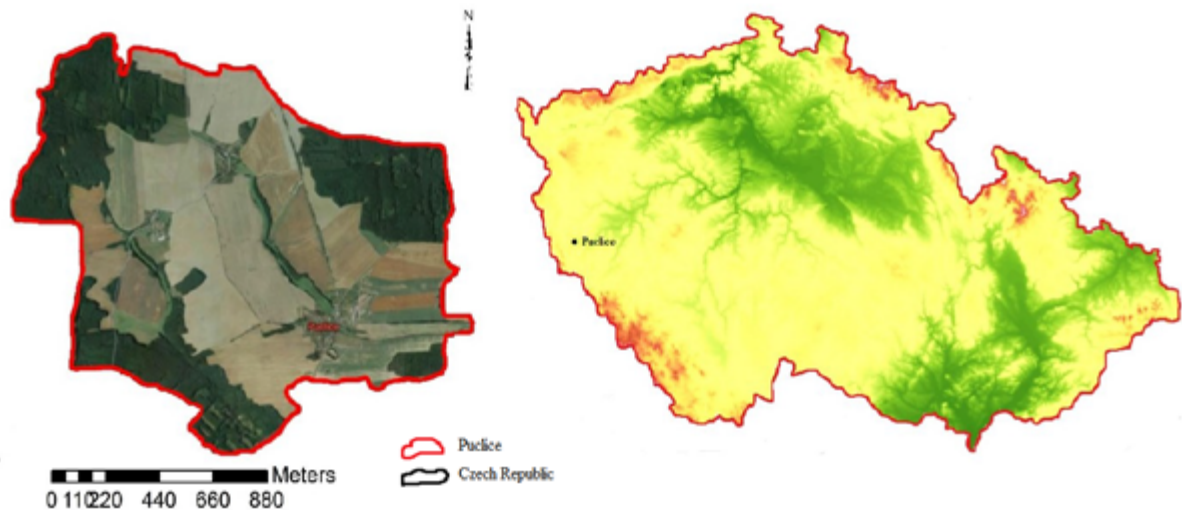


Figure 1: Location of investigated area

2.3 Rainfall simulator design and methodology used

Rainfall field experiments were conducted within rainfall simulator campaigns of Czech Research Institute for Soil and Water Conservation. The rainfall simulator used consists of water tank, pump, control unit and boom holding the spraying system. The characteristics of the rainfall simulator is described in the Table 1. The spraying system covers area 3 by 10 meters in size inside which the experimental plot 2 by 8 meters with constant rainfall characteristics. Funnel-like collector is installed at the bottom of the plot where the flow rate is measured and samples collected. For the scheme of rainfall simulator design see Figure 2. The rainfall simulation sequence consists of two runs; the first is performed under natural initial conditions until the flow rate at the outflow becomes steady and the second one is conducted under fully saturated soil conditions. During the experiments the amount of surface runoff is sampled in regular intervals.

Table 1: Characteristics of rainfall simulator used for field experiments

| Parameters | |
|---------------------------------|--------|
| Length [m] | 8.70 |
| Width [m] | 2.35 |
| Area [m ²] | 20.45 |
| Number of nozzles | 4 |
| Type of nozzles | 30 WSQ |
| Rain mode | Stable |
| Nozzle height above surface [m] | 2 |
| Rainfall intensity [mm/h] | 60 |

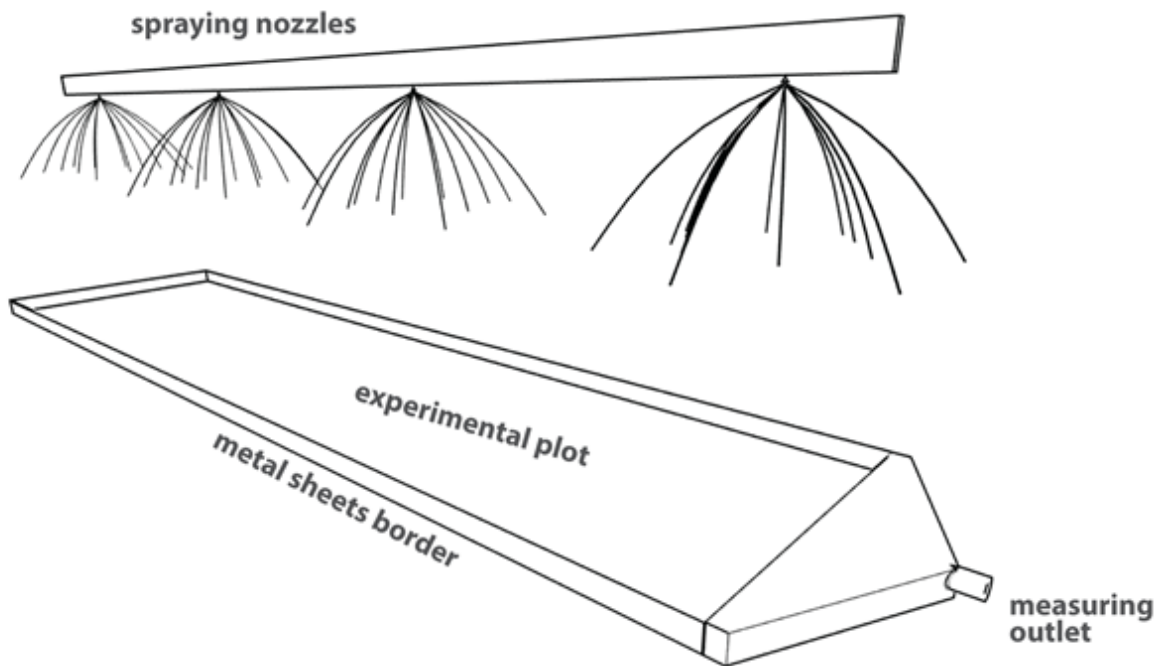


Figure 2: The scheme of the rainfall simulator used for field experiments

3 Calibration of the EROSION-2D model

The calibration process consists of rainfall experiments with known rainfall intensity and duration, measured runoff and values of model input parameters. The process of model calibration and determination of Skinfactor for individual crop combinations is conducted in Erosion-2D software.

All measured input parameters - grain size composition, bulk density, organic carbon content, initial humidity, roughness and percentage of vegetation coverage are entered into the model. The infiltration model is then calibrated by iterative setting of the Skinfactor value. Because the calibration process in EROSION-2D model requires a high degree of manual work whole calibration process was automatized using R language and thus time demanding calibration process has been decreased. From the table of parameters RScript selects following input parameters:

- clay content [%],
- silt content [%],
- sand content [%],
- content of organic matter [%],
- bulk density [g/m^3],
- initial moisture [%],
- infiltration in the last step of simulation [mm/min],
- final minute of the simulation,
- total runoff [l],
- rainfall intensity [mm/min],
- experimental area [m].

The calibration of the Skinfactor is based on two methods used. Skinfactor 1 is calculated in a way to achieve the greatest conformity in the final infiltration, i.e. at the moment of steady flow. Skinfactor 2 is determined in a way that the total volume of the simulated runoff is best fitted to the total volume of the measured runoff. The skin factor is calculated using two methods for control and both Skinfactor should differs as little as possible. Skinfactor 1 is selected as the result of the calibration parameter. The result of the whole calibration process contains data set of Skinfactor values for

different conditions of soil, initial moisture, crop management and stage of crop growth together with the different variations of crops. An analysis between Skinfactor and other input parameters is conducted in order to determine dependence of Skinfactor from other variables and in order to derive reliable transfer functions. The success of the Skinfactor calibration is visualized by graphical comparison of the modelled and measured infiltration and the difference between the best modelled and measured runoff is evaluated.

4 Results and conclusion

The field simulation experiments were carried out for 141 rainfall simulations considering various crop types, vegetation stage conditions and variable soil initial moisture conditions. The rainfall experiments were performed for two types of soil saturation; natural state and fully saturated state with the duration of the artificial rainfall events 15 minutes and 30 minutes.

For the purpose of the article annual sunflower was chosen as an example. The measured characteristics and results of calibration process are listed in the Tables 2 and 3. The graphical interpretation of the calibration process results are shown at the Figures 3 and 4. The infiltration curve graphs (Fig. 3 and 4) reflects two variants of soil saturation; natural state and fully saturated state.

The least square method was used to statistically evaluate measured and modelled results for 141 experimental rainfall measurements together with the comparison between measured and modelled amount of surface runoff.

The calibration results show the strong dependence between the soil initial moisture and Skinfactor value (Figure 5). The Skinfactor values are increasing according to the graduated initial soil moisture. The more saturated the soil is, the greater the value of Skinfactor and thus the infiltration as well in comparance with the initial conditions.. The final results of whole calibration process consist in a creation of Skinfactor dataset values for the different combinations of crops, growth stage of crops, crops management, soil initial moisture conditions and soil properties. The database created represents an essential and important part of the accurate application of the Erosion-2D and Erosion-3D model in the condition of Czech and Slovak Republic. A beneficial step will be the determination of Skinfactor values for individual crops together with the defined initial soil moisture. After that it will be clear which Skinfactor value the user should choose for the specific crops and soil initial conditions.

Table 2: Summary of measured characteristics of annual sunflower and calibrated Skinrunoff

| Characteristics | Annual Sunflower | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------------------------|--|
| | Date of measurement | | | | | |
| | 7.6. 2017 (natural condition) | 7.6. 2017 (saturated condition) | 11.7. 2017 (natural condition) | 11.7. 2017 (saturated condition) | 24.8. 2017 (natural condition) | 24.8. 2017 (saturated condition) |
| Clay [%] | 11,7 | 11,7 | 11,7 | 11,7 | 11,7 | 11,7 |
| Silt [%] | 51,5 | 51,5 | 51,5 | 51,5 | 51,5 | 51,5 |
| Sand [%] | 36,8 | 36,8 | 36,8 | 36,8 | 36,8 | 36,8 |
| Corg [%] | 1,52 | 1,52 | 1,63 | 1,63 | 1,42 | 1,42 |
| Bulk density [kg/m ³] | 1490 | 1510 | 1500 | 1485 | 1476 | 1505 |
| Initial moisture [%] | 19,12 | 28,97 | 12,42 | 24,43 | 24,43 | 24,43 |
| Cumulative runoff [l] | 445 | 490,5 | 406 | 461,8 | 348 | 398 |

| | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Skinfactor 1 [-] | 0,077 | 0,882 | 0,008 | 0,142 | 0,018 | 0,019 |
| Skinfactor 2 [-] | 0,035 | 0,257 | 0,003 | 0,056 | 0,068 | 0,0789 |

Table 3: Summary of measured characteristics of annual sunflower and calibrated Skinrunoff

| Characteristics | Date of measurement | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--|
| | Annual Sunflower | | | | | |
| | 21.5.2018 (natural condition) | 21.5. 2018 (saturated condition) | 2.7. 2018 (natural condition) | 2.7. 2018 (saturated condition) | 23.7. 2018 (natural condition) | 23.7. 2018 (saturated condition) |
| Clay [%] | 12.3 | 12.3 | 12.3 | 12.3 | 12.3 | 12.3 |
| Silt [%] | 52.7 | 52.7 | 52.7 | 52.7 | 52.7 | 52.7 |
| Sand [%] | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 |
| Corg [%] | 1.46 | 1.46 | 1.53 | 1.53 | 1.22 | 1.22 |
| Bulk density [kg/m ³] | 1500 | 1500 | 1410 | 1410 | 1430 | 1430 |
| Initial moisture [%] | 7.94 | 20.67 | 4.66 | 22.17 | 8.29 | 27.01 |
| Cumulative runoff [l] | 438.7 | 482 | 415.5 | 489.2 | 417.3 | 478.9 |
| Skinfactor 1 [-] | 0.002 | 0.112 | 0.061 | 0.085 | 0.0004 | 0.347 |
| Skinfactor 2 [-] | 0.035 | 0.257 | 0.003 | 0.056 | 0.068 | 0.079 |

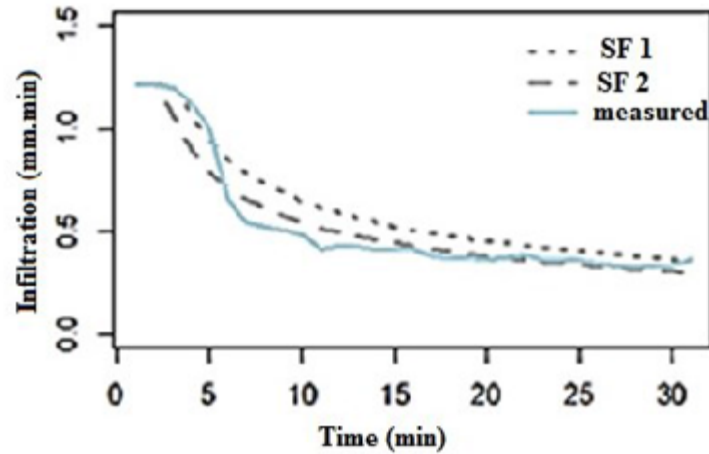


Figure 3: Measured and modelled infiltration curve (Annual sunflower, natural condition)

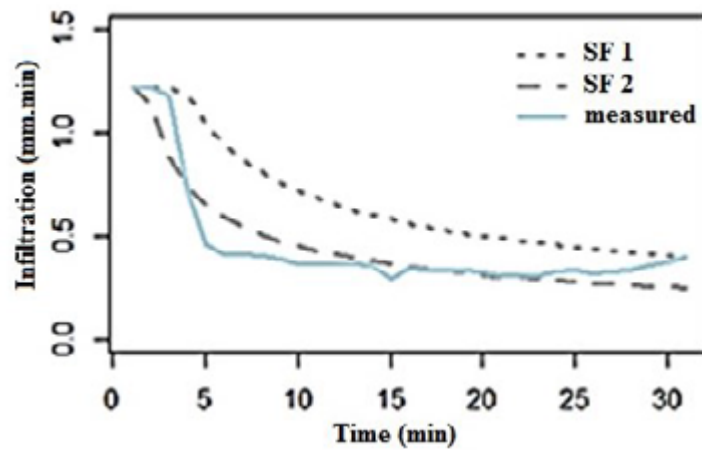


Figure 4: Measured and modelled infiltration curve (Annual sunflower, fully-saturated condition)

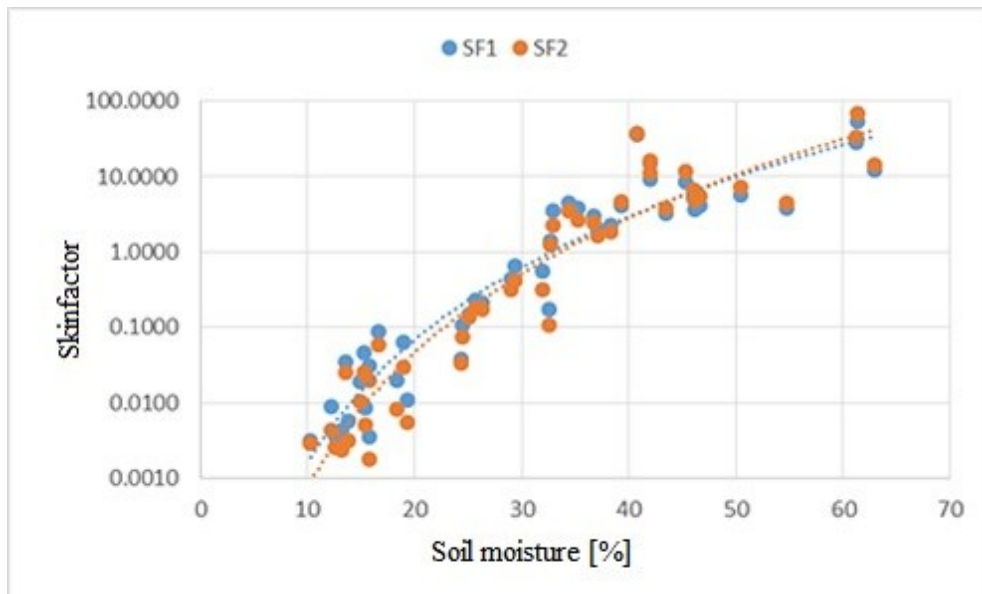


Figure 5: Dependence of Skinfactor 1 and Skinfaktor 2 on initial soil moisture

Acknowledgements

The study was supported by the Ministry of Agriculture of the Czech Republic under Grant NAZV QK1810341 „Creating a national database of parameters for the mathematical simulation model EROSION-3D and its standardization for routine use in the Czech Republic”.

The publication is the result of the project implementation: „Centre of Excellence of Integrated Flood protection of Territory“, ITMS 26240120004, supported by the Research & Development Operational Programme funded by the ERDF.

References

- [1] Lal, R.: Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, vol. 304, pp. 1623–1627. ISSN: 1095-9203.
- [2] Aksoy, H., Kavvas, M. L.: A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. *Catena*, 65, 2005, pp. 247–271. ISSN: 0341-8162.
- [3] Grismer, M.: Standards vary in studies using rainfall simulators to evaluate erosion, *Calif. Agric.*, 66, pp. 102–107, 2012.
- [4] Wang, L., Dalabay, N., Lu, P., Wu, F.: Effects of tillage practices and slope on runoff and erosion of soil from the loess plateau: China, subjected to simulated rainfall. *Soil Tillage Res*, 2010, Vol. 166, pp. 147–156. ISSN: 0167-1987.
- [5] Guinot, V., Gourbesville, P.: Calibration of physically based models: back to basics?, *Journal of Hydroinformatics*. 2003 Vol. 5, No. 4, ISSN 1464-7141.
- [6] Brath, A., Montanari, A., Moretti G.: Assessing the effect on flood frequency of land use change via hydrological simulation (with uncertainty), *Journal of Hydrology*. 2006, Vol. 3, No. 24, pp. 141-153. ISSN: 0022-1694.
- [7] Mrnčo, I., Blštak, P., Hudec, P., Gibala, T., Michaeli, E., *Acta facultatis studiorum humanitatis et naturae Universitas Prešovensis, Folia geographica*. Vol. 56, 2014, No. 1, ISSN 1336-6157.
- [8] Schmidt, J., A mathematical model to simulate rainfall erosion, *Catena*. Vol. 19, 1991, pp. 101–109. ISSN: 0341-8162.
- [9] Némětová, Z., Danáčová, D. Process for the parameterization of a soil erosion model based on a small rainfall simulator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 603, Section 1, 2019, pp. 12.
- [10] Green, W. H., Ampt, G. A.: Studies on soil physics. I: The flow of air and water through soils. *J. Agr. Sci.* 4, pp. 1-24, 1911.

Viera Rattayová¹

Študijný program: Krajinárstvo, 2. ročník

ANALÝZA NEISTÔT V PARAMETROCH CN METÓDY A ICH VPLYV NA VÝSLEDNÉ HODNOTY KULMINAČNÝCH PRIETOKOV NA VYBRANÝCH POVODIACH V MYJAVSKOM REGIÓNE

ANALYSIS OF UNCERTAINTY IN THE PARAMETERS OF THE CN METHOD AND THEIR IMPACT TO PEAK FLOW VALUES- A CASE STUDY IN SMALL UNGAUGED BASINS ON MYJAVA REGION

Abstract

Uncertainty in the results of hydrological modelling with the CN method in the ungauged watershed is one of the most discussed problem among Central Europe hydrologists. The article points to high uncertainty in results of peak flows calculates with different values of input parameters. Analysis was realized on small, ungauged basins in the cadastral area of Vrbovce village. Flash floods are regularly recurring in Vrbovce village and solution of this problem is crucial for accurate values of peak flow modelling.

Key words

uncertainty, peak flow, CN method, initial abstraction ratio

1. Úvod

CN metóda patrí k celosvetovo najpoužívanejšej metóde na odhad výšky priameho odtoku na povodiach, na ktorých nie sú dostupné dostatočne dlhé rady hydrologických meraní. Táto jednoduchá, empirická metóda je založená na jednom sústredenom parametri CN, ktorý zjednodušené reprezentuje hydrologické procesy v povodí. Výber hodnoty tohto parametra závisí od informácií o povodí, ktoré nie sú vždy dostatočne presné a často sú založené len na odhade. Taktiež samotný výpočet výšky priameho odtoku prináša neistoty vo vstupných parametroch, ktoré výrazne ovplyvňujú výsledky modelovania. Napriek spomínaným neistotám je však tento model jediným dostupným riešením základných hydrologických a vodohospodárskych úloh. Tento článok poukazuje na nepresnosti výsledkov modelovania kulminačného prietoku metódou SCS-CN, ktoré sú zapríčinené chybným výberom parametrov v prípade modelovania priameho odtoku na malých povodiach, na ktorých nie je dostupný dostatočne dlhý rad meraní prietokov. Nesprávny výber parametrov pritom spôsobuje percentuálne odchýlky vo výsledkoch kulminačných prietokov až o 98%.

2. Metodika

SCS-CN metóda je celosvetovo využívaný empirický zrážkovo-odtokový model na určovanie objemu priameho odtoku z povodia. Táto metóda bola vyvinutá U.S. Soil Conservation Service v roku 1956. Vzťah medzi charakteristikami povodia a predchádzajúcou zrážkovou udalosťou je opísaný pomocou čísel odtokových kriviek (CN). Pomocou parametra CN je možné transformovať

¹ Viera Rattayová Ing., Katedra vodného hospodárstva krajiny, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, Bratislava

objem dažďa na objem priameho odtoku. Hodnoty odtokových kriviek boli empiricky odvodené z dát na poľnohospodársky využívaných povodiach v USA.

Povodie je v CN metóde charakterizované jedným parametrom CN, charakterizujúcim podmienky na celom povodí.

Metóda SCS-CN je založená na vzťahu:

$$Q = \frac{(P-I_a)^2}{S+(P-I_a)} \quad (1)$$

kde I_a je počiatková strata (retencia povodia) v mm; S je potenciálna maximálna retencia povodia [mm]; Q je výška priameho odtoku z povodia [mm]; P je úhrn zrážok [mm]; a CN je číslo odtokovej krivky [-]. Vzťah medzi S [mm] a CN [-] má tvar:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (2)$$

Metódu SCS-CN je možné využiť aj ako nepriamu metódu na výpočet návrhového prietoku z malého povodia. V tomto prípade sú vstupnou hodnotou zrážky s danou priemernou dobou opakovania (pravdepodobnosťou prekročenia) a dobou trvania rovnou dobe koncentrácie odtoku z povodia. Predpokladáme pri tom, že návrhové zrážky spôsobia návrhový prietok s rovnakou priemernou dobou opakovania a počiatkovú stratu I_a uvažujeme rovnú 0. Počiatková strata je však jedným z parametrov rovnice, ktorý nie je možné exaktne určiť. Je priamo úmerná parametru počiatkovej straty (λ), ktorý je jediným z parametrov metódy CN, ktorý je variabilný. Rovnica počiatkovej straty má tvar:

$$I_a = \lambda * S \quad (3)$$

Parameter počiatkovej straty označovaný v metóde CN ako lambda (λ) je veľmi dôležitým parametrom v CN metóde. Z veľkej miery je ovplyvnený klimatickými podmienkami na povodí, najmä evaporáciou. Tá je však ovplyvnená veľkým množstvom klimatických faktorov ako solárna radiácia, teplota, prúdenie vetra, vlhkosť, orientácia a dĺžka oslnenia. Tento parameter je jediným parametrom metodiky CN, ktorého hodnota nie je presne určená. Na jej určenie neexistuje metodika a vzhľadom na množstvo vstupných parametrov, ktoré túto hodnotu ovplyvňujú, je odhad veľmi náročný. Podľa pôvodnej metodiky vytvorenej Americkou službou pre ochranu pôdy je fixná hodnota $\lambda=0,2$ [1]. Táto hodnota sa však nezakladá na všeobecne platných vedeckých princípoch, preto sa nedá považovať za záväznú. Množstvo autorov realizovalo výskumy s cieľom určiť optimálnu hodnotu λ [2][3][3][4][5][6]. Na základe týchto výskumov je možné konštatovať, že hodnota parametra lambda stanovená Americkou službou pre ochranu pôdy je prevažne vysoká a optimálna len pre veľmi malú časť povodí. Woodward a kol. [7], ktorí analyzovali 28301 zrážkovo-odtokových udalostí, odporúčajú využívať hodnotu $\lambda = 0,05$. V ich výskume, ktorý realizovali na 307 povodiach v 24 štátoch USA odvodili medián $\lambda = 0,0476$, ktorý najlepšie koreloval pre 82% skúmaných povodí. Taktiež množstvo štúdií iných autorov naznačuje, že najvhodnejšou hodnotou $\lambda = 0,05$ [8][3].

Predchádzajúce vlhkosťné podmienky povodia vyjadrujú množstvo vody dostupnej v pôdnom profile (prípadne stupeň nasýtenia pôdy) pred začiatkom zrážkovej udalosti. So zvyšujúcim sa stupňom nasýtenia pôdy pred zrážkovou udalosťou sa znižuje objem vody, ktorý ešte môže vsiaknuť do pôdy, skraca sa čas, za ktorý dôjde k jej úplnému nasýteniu pôdy, po ktorom dochádza k tvorbe odtoku z povodia. Vplyv predchádzajúcich vlhkosťných podmienok na saturáciu povodia je funkciou objemu vzduchu v pôdnom stĺpci V_a . Tento efekt je v metodike SCS- CN vyjadrený ako CN parameter.

V metodike SCS-CN sú hodnoty čísel odtokových kriviek rozdelené do troch kategórií predchádzajúcich vlhkostných podmienok.

Tab.1: Kategórie predchádzajúcich vlhkostných podmienok podľa Ven te Chow [9]

| AMC | Celkový úhrn predchádzajúcich zrážok za 5 dní | |
|-----|---|----------------------|
| | mimo vegetačného obdobia | vo vegetačnom období |
| I | < 13 mm | < 36 mm |
| II | 13-28 mm | 36-53 mm |
| III | > 28 mm | > 53 mm |

Predchádzajúce vlhkostné podmienky je potrebné určiť na základe radu klimatologických meraní úhrnov zrážok. Pri modelovaní odtoku z povodií, na ktorých neboli v minulosti realizované merania, však nie je možné presne určiť kategóriu predchádzajúcich vlhkostných podmienok. V praxi sa preto často využívajú stredné hodnoty CN z druhej kategórie, prípadne najvyššie hodnoty CN z tretej kategórie.

Schopnosť pôdy infiltrovať vodu do pôdneho stĺpca je jedným z faktorov, ktoré ovplyvňujú výber čísla odtokovej krivky. Základným faktorom pre posudzovanie infiltračnej schopnosti pôdy je jej textúra- granulometria pôdnych častíc. Ďalšími významnými faktormi sú štruktúra, hydraulická vodivosť, ale aj predchádzajúci obsah vlhkosti. Na základe vlastností sú pôdy podľa metodiky SCS-CN zaradené do tried A-D podľa maximálnej infiltračnej kapacity na nasledujúce hydrologické skupiny [1]: A- viac ako 0,76 cm/h; B- 0,28-0,76 cm/h; C- 0,13-0,38 cm/h; D-menej ako 0,13 cm/h. Tieto kategórie sú jedným z kritérií pri výbere hodnoty CN.

3. Popis skúmaného územia

Skúmaným územím je katastrálne územie obce Vrbovce. Obec Vrbovce leží na štátnej hranici medzi Českou Republikou a Slovenskom, v Trenčianskom kraji, v okrese Myjava. Podložie je tvorené prevažne flyšovými sedimentami. Typy pôdy prítomné na riešenom území sú charakteristické nízkou priepustnosťou a nízkou akumulácnou kapacitou. Cez Vrbovce preteká tok štvrtého rádu Teplica, ktorý má na území niekoľko pravostranných a ľavostranných prítokov. Analýzy boli realizované na povodiach vybraných piatich prítokov toku Teplica, ktoré majú podľa analýz vysokú akumuláciu odtoku a pri zrážkových udalostiach s nízkou dobou opakovania prispievajú ku vzniku bleskových povodní v zastavanom území obce- Haluzníkovho toku (9.31 km²), Lulovského toku (3.36 km²), toku Záhutník (2.34 km²), toku Zápasečník (3.29 km²) a nepomenovaného toku (1.06 km²).

4. Výsledky a diskusia

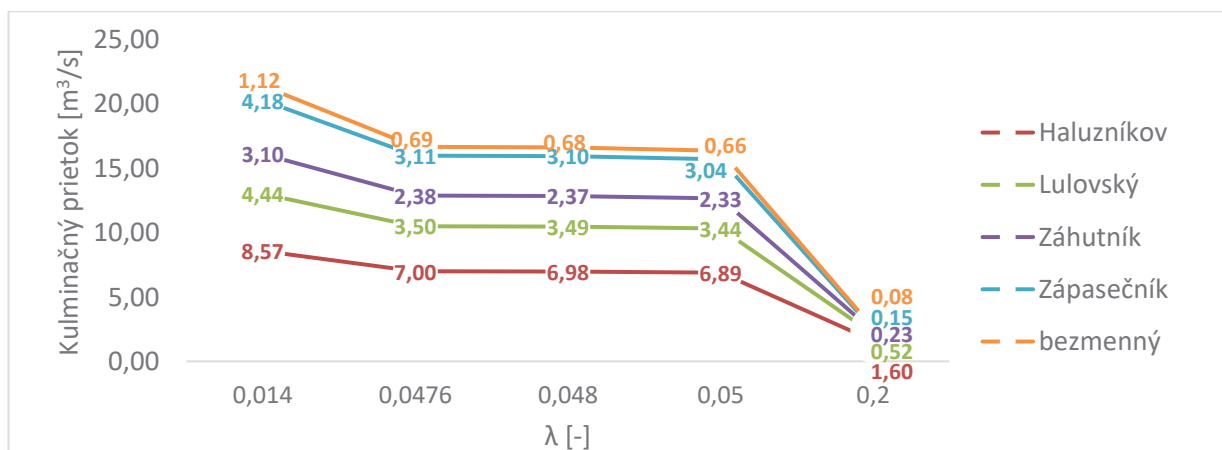
4.1 Neistoty v parametri lambda (λ) a ich vplyv na výsledný kulminačný prietok

Cieľom výskumu bolo poukázať na vplyv neistoty v parametri λ na výsledné hodnoty kulminačných prietokov na povodiach, na ktorých nie sú dostupné hydrologické merania.

Hodnoty parametra lambda, tak ako bolo spomínané vyššie, nie sú exaktne určené a podľa rôznych autorov sa tieto hodnoty líšia. Na základe štúdia literatúry sme sa rozhodli pri analýze využiť nasledovné hodnoty parametra λ :

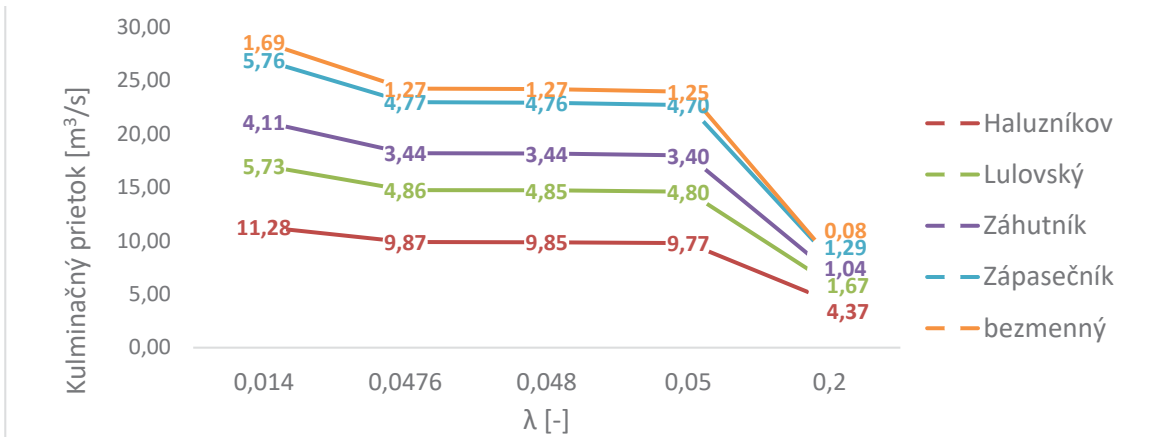
- $\lambda = 0,05$ [7]
- $\lambda = 0,2$ [1]
- $\lambda = 0,0476$ [2]
- $\lambda = 0,048$ [6]
- $\lambda = 0,014$ [8]

Tieto hodnoty sme využili pre dve alternatívy hodnôt CN, spadajúcich do II. kategórie predchádzajúcich vlhkostných podmienok. Prvá alternatíva hodnôt CN bola odvodená pre spôsob využívania územia, ktorý zodpovedá súčasnému reálnemu stavu na povodiach na základe ortofoto máp a informácii z národného registra poľnohospodárskych pôd (označená ako BEST). Druhá alternatíva hodnôt CN bola odvodená pre taký spôsob využívania územia, pri ktorom by sa všetky pozemky registrované ako poľnohospodárska pôda využívali ako orná pôda (označené ako WORST). Na výpočet boli použité návrhové zrážky vypočítané metódou jednoduchého škálovania, s dobou trvania rovnajúcou sa dobe koncentrácie odtoku z povodia a dobou opakovania 100 rokov. Nakoľko na daných povodiach nie sú dostupné hydrologické merania, nebolo možné výsledné hodnoty modelovaných prietokov porovnať s referenčnou hodnotou vypočítanou z meraných prietokov.



Obr.1: Výsledné hodnoty kulminačných prietokov pre rôzne hodnoty parametra λ , pre vybraných 5 povodií, a alternatívu CN čísiel BEST

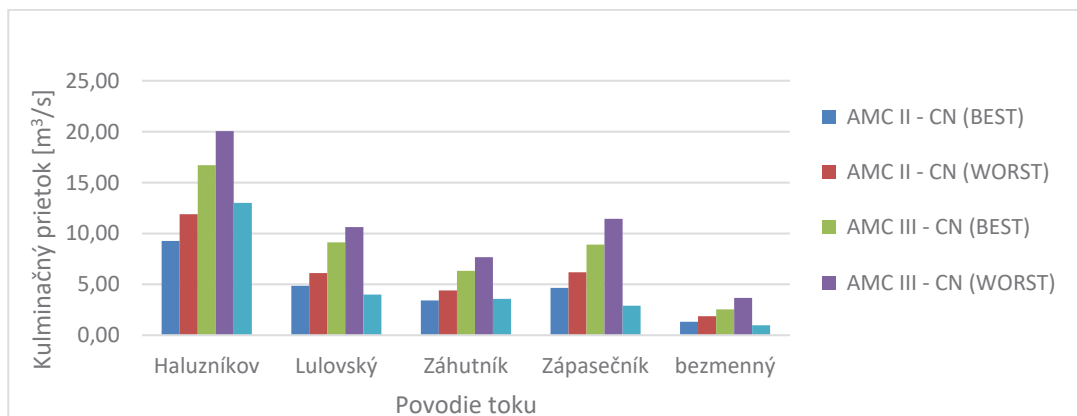
Hodnoty kulminačných prietokov na vybraných povodiach sa s využitím rôznych hodnôt parametra λ líšia pri alternatíve CN čísiel WORST o 85-98 %. (Obr. 2) , pri využití CN čísiel z alternatívy BEST o 87-95 % (Obr. 1).



Obr.2: Výsledné hodnoty kulminačných prietokov pre rôzne hodnoty parametra λ , pre vybraných 5 povodií, a alternatívu CN čísiel WORST

4.2 Neistoty v určovaní predchádzajúcich vlhkostných podmienok a ich vplyv na výsledný kulminačný prietok

V ďalšej fáze výskumu sme analyzovali vplyv predchádzajúcich vlhkostných podmienok na výsledné hodnoty kulminačných prietokov v záverečných profiloch povodií (Obr. 3). Nakoľko pre povodia nie sú dostupné klimatologické dáta, nie je možné určiť predchádzajúce vlhkostné podmienky z 5 dňových zrážok. Pre porovnanie bola k týmto hodnotám vložená aj výsledná hodnota analýzy kulminačného prietoku z programu DesQ, ktorý predstavuje alternatívu CN metódy vyvinutú Hrádkom [10]. Výsledné hodnoty kulminačných prietokov sa pre vybrané povodia líšia o 54-64%.



Obr.3: Porovnanie výsledných kulminačných prietokov pre II. a III. kategóriu predchádzajúcich vlhkostných podmienok, $\lambda=0$

5. Záver

Hydrologické modelovanie na povodiach bez priamych meraní je veľmi náročný a v našich podmienkach často diskutovaný problém. Najbežnejším modelom používaným v týchto podmienkach je metóda čísiel odtokových kriviek, ktorá však so sebou prináša veľkú neistotu vo vstupných parametroch, ktorá sa následne prenáša do výsledných hodnôt povrchového odtoku a následne aj kulminačného prietoku. Vysoká nepresnosť vo výsledkoch môže byť vážnym problémom v prípade, že sa tieto výsledky využívajú ako vstupné hodnoty pri navrhovaní malých

vodohospodárskych stavieb. Na základe výskumu je zrejmé, že samotné hydrologické modelovanie CN metódou na povodiach bez priamych hydrologických pozorovaní neposkytuje dostatočne presné výsledky, využiteľné pri ďalších výpočtoch a návrhoch opatrení. Tieto výsledky môžu byť použité ako prvotný odhad prietoku, na upresnenie týchto výsledkov je však potrebné použiť ďalšie postupy, ako štatistické metódy, regionalizáciu parametrov, alebo využiť analógiu so susedným povodiami s rovnakými charakteristickým znakmi.

6. PodĎakovanie

Článok vznikol vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

7. Literatúra

- [1] S. K. MISHRA AND V. P. SINGH, *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*, vol. 42. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003.
- [2] R. JIANG, "Investigation of Runoff Curve Number Initial Abstraction Ratio," *MS Thesis, Watershed Manag. Univ. Arizona, Tucson*, 2001, p. 120.
- [3] R. H. HAWKINS, T. J. WARD, D. E. WOODWARD, AND J. A. VAN MULLEM, *Curve number hydrology: State of the practice*. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2009.
- [4] S. K. MISHRA, R. K. SAHU, T. I. ELDHO, AND M. K. JAIN, "An improved Ia-S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology," *Water Resour. Manag.*, 10 2006, vol. 20, no. 5, pp. 643–660.
- [5] W. J. TAN, J. F. KHOR, L. LING, AND Y. F. HUANG, "Misuse of Lambda (λ) in NRCS-CN Model," *E3S Web Conf.*, 11 2018, vol. 65, p. 07006.
- [6] Z. H. SHI, L. D. CHEN, N. F. FANG, D. F. QIN, AND C. F. CAI, "Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China," *Catena*, 04 2009, vol. 77, no. 1, pp. 1–7.
- [7] D. E. WOODWARD, R. H. HAWKINS, R. JIANG, A. T. HJELMFELT, J. A. VAN MULLEM, AND Q. D. QUAN, "Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio," in *World Water and Environmental Resources Congress*, 2003, pp. 691–700.
- [8] E. A. BALTAS, N. A. DERVOS, AND M. A. MIMIKOU, "Technical note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2007, vol. 11, no. 6, pp. 1825–1829.
- [9] V. TE CHOW, "Handbook of applied hydrology," *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Bull.*, 1965, vol. 10, no. 1, pp. 82–83.
- [10] F. HRÁDEK AND K. KURÍK, *Maximálny odtok z povodí: teórie svahového odtoku a hydrologický model Des-Q*. 2001.

Veronika Soldánová¹

Študijný program: Krajinárstvo, 4. ročník

VODOHOSPODÁRSKA BILANCIA NÁDRŽE PRI NEMERANÝCH PRIETOKOCH

RESERVOIR WATER BALANCE AT UNMEASURED STREAM FLOWS

Abstract:

This paper considers the determination of time series of river flows in catchments without direct monitoring of this variable. This paper proposes a method for the acquisition of monthly data, which is useful for various purposes. Different parameters of various water management structures can be determined based on information from such data series, such as irrigation reservoir volumes or water demand for irrigation. While identifying unknown stream flows required for such a calculation, authors suppose that historical climatic data for the given area and flows in nearby river catchments are available. This article includes a description of the method of selecting river catchments such that their measured flows can be used in the calculation of an unknown flow of a different stream. This study compares hydrological modeling, linear regression with regularization, and machine learning methods (support vector machines, random forest). Statistical indicators evaluate the calculated flows with the result that the most suitable approach is the support vector machines method using a linear kernel and LASSO regularisation.

Kľúčové slová: závlahová nádrž, namerané prietoky, machine learning

1. Úvod

Kontinuálne série prietokov vo vodných tokoch sú potrebné vo všetkých fázach vodného hospodárstva. Mnohé parametre vodohospodárskych stavieb, ako napríklad objemy zavlažovacích nádrží alebo dopyt po vode na zavlažovanie, možno určiť na základe informácií z takýchto údajov. Na niektoré účely (napr. protipovodňová ochrana) sú potrebné denné alebo hodinové rady prietokov, táto práca sa však zameriava na získavanie mesačných údajov, ktoré sú vhodné na účely týkajúce sa závlah a závlahových nádrží.

Závlahové nádrže sa používajú na kumulovanie vody počas obdobia jej prebytku a na jej následné využitie v období sucha. Takéto nádrže sa často používajú na riešenie problémov so suchom v malých povodiach alebo v okrajových častiach väčších povodí, kde zavlažovaná plocha zvyčajne nepresahuje niekoľko stoviek hektárov. Zásobované sú menšími tokmi, ktoré často nemajú systematické merania prietokov.

Pri návrhu nádrže je dôležité posúdiť jej funkciu a vyhodnotiť hospodárenie s vodou prostredníctvom vodohospodárskej bilancie. Vstupné údaje použité pri takomto výpočte zahŕňajú prítok vody do nádrže, dopyt po odbere vody z nádrže, údaje o povinnom odtoku vody pod nádržou, vyparovanie a ďalšie straty vody z nádrže. Tieto údaje sa požadujú retrospektívne každý mesiac v najmenej 30 ročnom období, ktoré by malo zahŕňať dostatočný výskyt suchých a mokrých rokov

¹ Veronika, Soldánová, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Katedra vodného hospodárstva krajiny

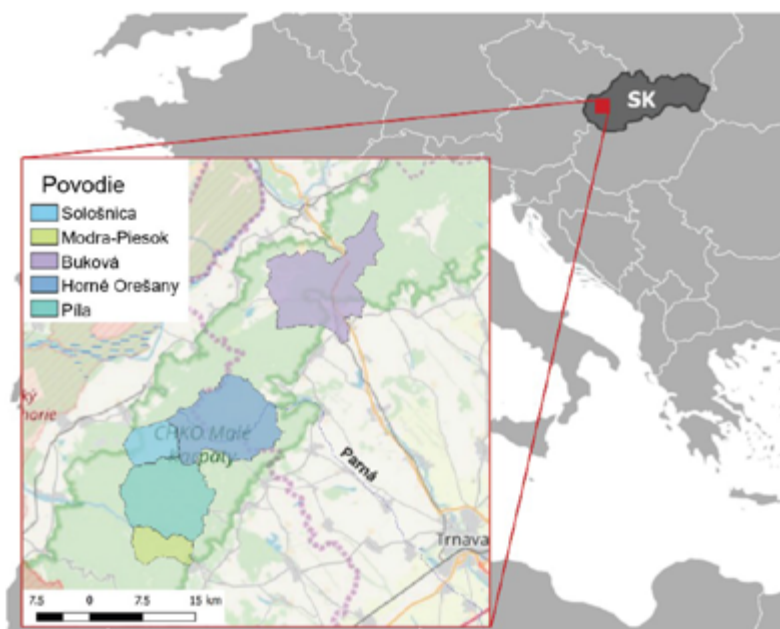
potrebných. Ako už bolo uvedené, údaje o prítokoch nie sú často k dispozícii, pretože zriedkavo existujú dlhodobé merania povodí s malou rozlohou.

Predmetom tohto článku je porovnanie rôznych metód určovania prietokov pre výpočty návrhu malej vodnej nádrže. Autori nevedia o predchádzajúcich dielach priamo zameraných na túto tému, hoci časť tejto úlohy - určovanie tokov v povodiach bez meraní, študovali rôzni autori.

Prieskum regionálnych metód používaných na určovanie tokov v povodiach bez meraní uviedol [1] a dobrým úvodom k tejto téme je tiež [2]. Stanovenie nameraných tokov sa môže vykonať pomocou hydrologických modelov [3], regresných metód [4] alebo umelých neurónových sietí [5].

1. Prípadová štúdia a popis údajov

Parná je malým horským tokom v Malých Karpatoch na západnom Slovensku, s veľkosťou povodia 45,59 km². Na určenie jeho priemerného denného prítoku boli v práci použité známe hodnoty prietokov z podobných povodí v jeho okolí (obrázok 1).



Obrázok č. 1: Situácia vybraných povodí

Tieto údaje boli získané z vodomerných staníc v Bukovej (povodie Trnávky), Modre (povodie Vištuckého potoka), Píly (povodie Gidry) a Sološnice (povodie Sološnického potoka) od Slovenského hydrometeorologického ústavu v Bratislave. Klimatické údaje boli získané z databázy European Climate Assessment & Dataset (ECA&D), ktorá obsahuje údaje o 12 klimatických prvkoch. Klimatické údaje sa poskytujú ako časopriestorové rady vo formáte netCDF, za obdobie rokov 1950 - 2018, pokrývajú priestorový rozsah 25 ° S – 75 ° S a 40 ° V – 75 ° V a majú priestorové rozlíšenie 0,25 ° x 0,25 °. V práci boli použité údaje od 1. januára 1980 do 31. augusta 2017. Časové rady denných hodnôt potenciálnej evapotranspirácie v jednotlivých povodiach boli vypočítané pomocou vzorca navrhnutého Oudinom v [6], ktorý ako vstup vyžaduje iba minimálnu a maximálnu teplotu.

2. Materiál a metódy

V práci sú porovnávané regresné a hydrologické metódy modelovania neznámych historických prietokov. Na vyhodnotenie účinnosti týchto metód bola spracovaná prípadová štúdia pre vodnú

nádrž Horné Orešany, na toku Parná. Výsledky výpočtov boli vyhodnotené pomocou vybraných štatistických ukazovateľov a porovnaním výsledkov vodnej bilancie nádrže s použitím nameraných a simulovaných prietokov.

Viacnásobná lineárna regresia (MLR) je najbežnejšou regresnou metódou používajúcou sa na nájdenie príslušných koeficientov pomocou metódy najmenších štvorcov. Základná rovnica je:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \beta_3 * X_3 + \dots + \varepsilon, \quad (1)$$

kde Y je závislá premenná, X_i sú vysvetľujúce premenné, β_0 je priesečník (konštantný člen), β_i je koeficient sklonu pre každú vysvetľujúcu premennú a ε je chyba merania.

Hlavnou podmienkou lineárnej regresie je to, že vysvetľujúce premenné X_i nesmú byť relatívne korelujúce, čo je prípad, ktorý sa predpokladal pri tejto úlohe. Preto boli zvolené vhodnejšie algoritmy. Pri použití metódy *Least Absolute Selection And Shrinkage Operator (LASSO)* vznikne jednoduchší model s menej premennými, v ktorom sa eliminuje multikolarita a ktorý zvyčajne lepšie generalizuje [7].

Metóda Support Vector Machines (SVM) je metóda strojového učenia s tzv. učiteľom, ktorú je možné použiť na výpočet klasifikačných a regresných úloh. Využíva myšlienku tzv. jadra (kernel), pomocou ktorého sa nelineárny výpočet zjednodušuje a premieta do lineárneho priestoru, čím sa úloha zjednodušuje [8]. Ďalšou dôležitou koncepciou metodiky SVM je jej schopnosť ignorovať malé chyby, v dôsledku čoho má model SVM dobré zovšeobecňujúce schopnosti.

Algoritmus *Random forest (RF)* [9] je tvorený súborom stromov, ktoré tiež môžu byť v závislosti od riešeného problému buď klasifikačné alebo regresné. Výsledná hodnota je priemerom hodnôt, ktoré vypočíta každý strom. Užívateľ si vyberie počet stromov v lese. Každý strom je trénovaný pomocou inej vzorky bootstrapu, čo vedie k získaniu rôznych stromov.

Koncepcný hydrologický model TUW [10] bol vyvinutý na Technickej univerzite vo Viedni. Vstupy do modelu pozostávajú z dennej série zrážok, teplôt vzduchu, evapotranspirácie a prietokov. Má 15 parametrov, ktorých hodnoty potrebné na kalibráciu boli hľadané pomocou genetického algoritmu.

Vzťah medzi prítokom vody do nádrže a odtokom vody z nádrže všeobecne definuje nasledujúci vzorec:

$$\Delta V = (I - O) \Delta t, \quad (2)$$

kde ΔV vyjadruje zmenu objemu vody v nádrži v čase, I je prítok do nádrže, O označuje výstupy (odtok, odbery a straty) a Δt je časový krok na vyhodnotenie bilancie.

Na implementáciu vodnej bilancie bol v R [11] vytvorený program na modelovanie akumulácie vody v nádrži, ktorého účelom je prehodnotiť uskutočniteľnosť požadovaného odberu vody. Tento model pracuje v mesačnom kroku.

3. Výsledky a diskusia

A. Výber vhodných povodí tokov

Režim odtoku z povodia závisí od jeho klimatických a geologických podmienok, topografických prvkov, typov prevládajúcich pôd, využívania územia atď. Povodia riek pre analogický výpočet by mali byť podobné povodiu toku, kde sa prietok určuje. Okrem toho je výhodné zvoliť povodia čo najbližšie k skúmanému povodiu, pretože niektoré jeho vlastnosti sa nemenia relatívne rýchlo, takže blízke povodia môžu mať mnoho podobných črt, a teda aj genézu odtoku.

Tabuľka č.1 ukazuje, že posudzované povodie je najviac podobné povodiu Gidra, (vodomerná stanica Píla) a povodiu Vištuckého potoka (stanica Modra-Piesok). Podobnosť je zrejma v numerickom

hodnotení základných topografických charakteristík, percenta typov pôdy a využívania pôdy. Rôzne typy pôdy sa líšia pomerom infiltrácie a odtoku vody v období dažďov, schopnosťou zadržiavať vodu v pôde a ďalšími vlastnosťami, ovplyvňujúcimi odtok. Tieto dve povodia budú preto uprednostňované v nasledujúcich výpočtoch. Uskutočnili sa aj iné analýzy, tu ich z dôvodu stručnosti nemožno podrobnejšie popísať.

Tabuľka č. 1: Porovnanie vlastností povodí

| Povodie | Rozloha (ha) | Topografické charakteristiky (median) | | | Pôdne druhy (%) | | | Využitie pôdy (%) | | | | |
|---------------|--------------|---------------------------------------|-----------|---------------|-----------------|--------------------|--------------------|-------------------|---------------|---------------|----------------|------------|
| | | Nadmorská výška (m n.m) | Sklon (°) | Expozícia (°) | Piesočnatá | Hlinito-piesočnatá | Piesočnato-hlinitá | Orná pôda | Listnaté lesy | Zmiešané lesy | Prechodné lesy | Intravilán |
| Buková | 4296.1 | 332.4 | 9.0 | 170 | 82.5 | 0 | 17.5 | 23.9 | 60.7 | 6.9 | 2.1 | 4.9 |
| Modra-Piesok | 937.7 | 495.1 | 8.0 | 92.9 | 0 | 54.3 | 45.7 | 0 | 91.5 | 0 | 8.5 | 0 |
| Horné Orešany | 3733.1 | 403.1 | 11.1 | 151 | 38 | 0 | 62 | 0 | 90.9 | 0.8 | 8.2 | 0 |
| Píla | 3289.9 | 426.7 | 9.8 | 161 | 12.8 | 16.3 | 70.9 | 0 | 92.4 | 0 | 7.1 | 0.5 |
| Sološnica | 1046.5 | 420.8 | 16.3 | 195 | 100 | 0 | 0 | 0 | 94.4 | 0 | 5.6 | 0 |

B. Hydrologické modelovanie

Výpočet pomocou modelu TUW prebiehal v dennom kroku a vypočítané prietoky sa následne prevádzali na mesačné. Kalibrácia sa vykonala na základe údajov o prietokoch a klíme z povodia Píla. Optimálne hodnoty parametrov modelu sa získali genetickým algoritmom s použitím údajov o prietoku a klíme z povodia toku Píla. Tieto parametre sa následne použili pri modelovaní povodia s neznámymi prietokmi (Veľké Orešany - Parná) pomocou miestnych údajov o klíme. Vypočítané denné a mesačné prítoky do nádrže Horné Orešany sú porovnané s nameranými hodnotami v tabuľke č. 2.

C. Výpočet regresie

V ďalšom kroku sa na výpočet prietokov použili regresné metódy. Tieto výpočty vychádzali z predpokladu, že merania prietokov sa začali nedávno, ako požiadavka na stanovenie dlhšej série historických tokov. Predpokladalo sa, že merania sa začali začiatkom roka 2016 (celé obdobie je 1980 - 2017). Na základe tohto obdobia sa odvodili regresné vzťahy a uplatňovali sa na celé historické záujmové obdobie.

Na nájdenie parametrov regresných modelov sa použilo gridové vyhľadávanie kombinované s metodikou opakovanej krížovej validácie. V tomto prístupe sa do vyhodnocovacieho algoritmu pošle sada modelových parametrov z vopred určenej mriežky. Výpočet sa uskutočnil v jazyku R [11].

Neznáme prietoky v toku Parná sa vypočítali pomocou prietokov zo štyroch „analogických“ povodí a z priemernej dennej teploty, zrážok a evapotranspirácie v povodí toku Parná. Keďže odtok z povodia je ovplyvňovaný nielen aktuálnymi hodnotami klimatických premenných, ale aj ich hodnotami z predchádzajúcich dní, boli zahrnuté aj údaje o klíme zo siedmich dní pred dátumom predpovede, tri premenné zhrňajúce predchádzajúce zrážky a premenné zhrňajúce predchádzajúce evapotranspirácie. Týmto spôsobom bola vytvorená tréningová sada s 35 vysvetľujúcimi premennými, ktorá pokrývala obdobie očakávaných krátkodobých meraní v toku Parná počas 608 dní (údaje za rok 2017 boli k dispozícii iba do augusta). Testovací súbor obsahoval rovnaké premenné, ale údaje sa vzťahovali na celé obdobie rokov 1980 – 2017.

Tabuľka č. 2: Vyhodnotenie metód

| Ukazovateľ | TUW | MLR | LASSO | SVM | RF |
|------------|-------|------|-------|------|------|
| RMSE | 0.17 | 0.15 | 0.14 | 0.14 | 0.15 |
| ME | -0.02 | 0.01 | 0.1 | 0.14 | 0.15 |
| NSE | 0.65 | 0.76 | 0.78 | 0.77 | 0.73 |
| PBIAS% | 0.81 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.88 |
| R2 | 0.66 | 0.77 | 0.78 | 0.76 | 0.77 |

RMSE – Stredná kvadratická chyba, ME – stredná chyba, NSE - koeficient Nash-Sutcliffe, PBIAS% – percentuálna odchýlka, R2 - koeficient determinácie

Výsledky regresných výpočtov sú uvedené v tabuľke č.2, ktorá ukazuje relatívne vyvážené výsledky získané pomocou štatistických metód a metód strojového učenia. Najlepšími metódami sú SVM, lineárna metóda využívajúca regularizáciu typu LASSO a prekvapivo jednoduchá MLR, ktorú však nemožno odporučiť, pretože vyžaduje, aby vysvetľujúce premenné medzi sebou nekorelovali. Táto zásada je pri tejto úlohe porušená a preto sa očakáva, že výsledky pomocou MLR budú nestabilné; pre iné toky môžu byť menej presné ako v tomto prípade. Pomerne zlé výsledky boli dosiahnuté metódou random forest (RF). Autori sa domnievajú, že problémom tejto metódy je, že je založená na regresných stromoch, ktoré nedokážu extrapolovať. Popísaná regresná úloha používala relatívne krátke tréningové obdobie a je pravdepodobné, že sa počas tohto obdobia nevyskytli žiadne extrémny, RF sa teda nemohol naučiť takúto udalosť.

D. Vodná bilancia nádrže

Na overenie presnosti výpočtu mesačných prietokov, sme ich spolu s nameranými prietokmi použili pri bilančnom výpočte nádrže. Hlavnými požadovanými údajmi boli časové rady mesačných množstiev závlah a prítok vody do nádrže. Ďalej výšky minimálnej a maximálnej hladiny vody v nádrži, jej minimálny a maximálny objem, plocha zavlažovanej oblasti, údaj o výpare z vodnej hladiny a ekologický prietok.

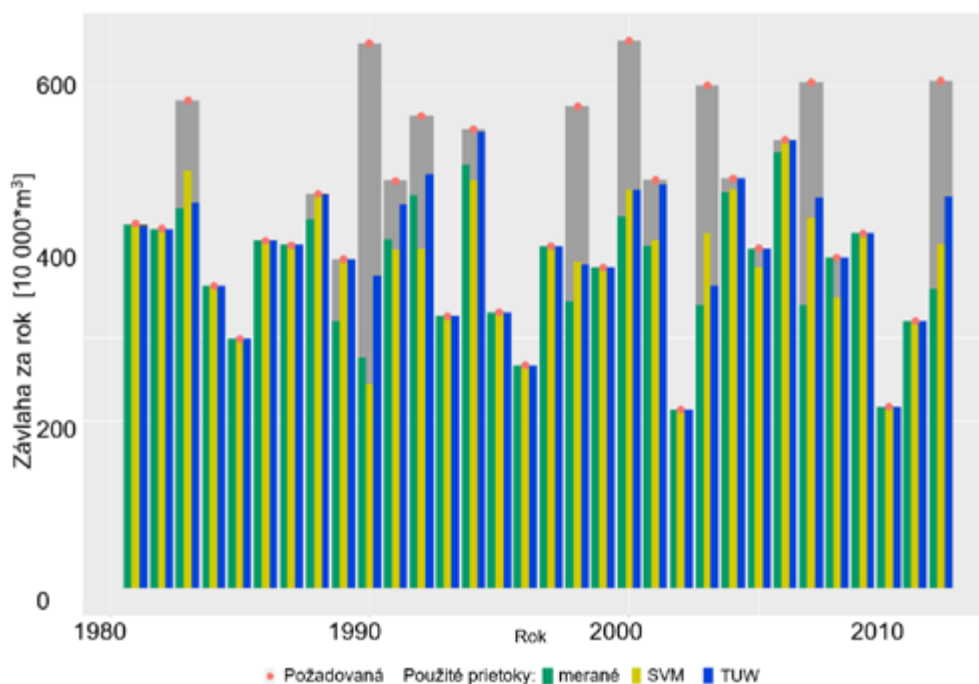
Vodná bilancia sa najprv vypočítala pomocou prietokov získaných analogicky a potom pomocou nameraných údajov. Na porovnanie výsledkov sa použili dve metódy. Prvou bolo vyhodnotenie zabezpečenia závlahy, ktorá predstavuje pomer dodanej a požadovanej závlahy v percentách:

$$\text{Zabezpečenie} = (\text{ZDodaná} / \text{ZPožadovaná}) * 100 \quad (3)$$

Ďalej bola zistená korelácia medzi dodaným ročným množstvom závlahovej vody na základe nameraných a vypočítaných prietokov. Výsledné údaje sú zhrnuté v tabuľke č.3, ktorá ukazuje vhodnosť použitých metód. Zabezpečenie závlahy (dostupnosť vody v nádrži) je tiež vyjadrená v obrázku č. 2, kde je možné vidieť relatívne vysokú zhodu, pokiaľ ide o zabezpečenie závlahy pri použití vypočítaných a nameraných prietokov.

Tabuľka č. 3: Vyhodnotenie zabezpečenia závlahy

| Metóda | Korelácia medzi ročnými vypočítanými a meranými prietokmi | Zabezpečenie závlahy v % |
|-----------------|---|--------------------------|
| Merané prietoky | 1.00 | 84.96 |
| TUW | 0.90 | 90.23 |
| MLR | 0.90 | 86.79 |
| LASSO | 0.92 | 87.77 |
| SVM | 0.90 | 87.04 |
| RF | 0.89 | 89.88 |



Obrázok č. 2: Grafické porovnanie zabezpečnosti závlahy

4. Záver

Cieľom tohto príspevku bolo porovnať rôzne metódy výpočtu neznámych prietokov v kontexte vyhodnotenia vodnej bilancie závlahovej nádrže. Porovnávané boli regresné a hydrologické metódy. Autori zistili, že ak sú pre príslušné povodie k dispozícii aspoň krátkodobé merania, najvhodnejšou metódou je výpočet prietoku pomocou regresie s regularizáciou LASSO, pretože rieši problém multikolinearity vstupných údajov. Druhou vhodnou metódou je metóda strojového učenia SVM, ktorá ponúka dobrú schopnosť zovšeobecnenia, čo je výhodné pre výpočty v malých povodiach, kde možno očakávať určitú neistotu, pokiaľ ide o údaje a modelovanie. Ak nie sú k dispozícii žiadne údaje o prietoku, musí sa použiť hydrologický model. V tomto článku bol použitý model TUW. Výsledné prietoky boli o niečo menej presné ako pri regresných metódach, avšak ich následné overenie v kontexte bilancie závlahovej nádrže tiež preukázalo jeho použiteľnosť.

Podakovanie:

Článok vznikol za podpory Agentúry na podporu výskumu a vývoja prostredníctvom finančnej podpory projektu APVV-15-0489, Vedeckej grantovej agentúre MŠVVaŠ SR a SAV, grant č. 1/0662/19 a vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra:

[1] Kohnova, S., Szolgay, J., Solin, L., Hlavcova, K., Regional methods for prediction in ungauged basins, Ostrava: Key Publishing, p. 113, ISBN: 80-87071-02-6, 2006.

[2] Hrachowitz, M. et al., A decade of predictions in ungauged basins (PUB)—a review, Hydrological sciences journal, vol. 58(6), pp. 1198-1255, 2013.

- [3] Viglione, A., et al., Comparative assessment of predictions in ungauged basins - Part 3: Runo signatures in Austria, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 17, pp. 2263-2279 , doi:10.5194/hess-17-2263-2013, 2017, 2013.
- [4] Gibbs, M. S., Maier, H. R., Dandy, G. C., A generic framework for regression regionalization in ungauged catchments, *Environmental modeling & software*, vol. 27, pp. 1-14, 2012.
- [5] Kuzmin, V. et al., Method of prediction of the stream flows in poorly gauged and ungauged basins, *Journal of Ecological Engineering*, vol. 20(1), pp. 180-187, 2019.
- [6] Oudin, L., Michel, C., Anctil, F., Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 1 - Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs?, *Journal of Hydrology*, vol. 303/ Nos. 1-4, pp. 275-289, 2005.
- [7] Friedman, J., Hastie, T., Tibshirani, R., Regularization paths for generalized linear models via coordinate descent, *Journal of Statistical Software*, vol. 33(1), pp. 1-22, 2010.
- [8] Vapnik, V., The Support vector method, *International Conference on Artificial Neural Networks*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 261-271, 1997.
- [9] Breiman, L., Random forests, *Machine Learning*, vol. 45(1), pp. 5-32, 2001.
- [10] Viglione, A., Parajka, J., TUWmodel: Lumped hydrological model for education purposes, R package version 1.0-1., 2018, Available from: <https://CRAN.R-project.org/package=TUWmodel> [retrieved July, 2019].
- [11] R Core Team, R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019, Available from: <https://www.R-project.org> [retrieved July, 2019].

Barbora Vaseková¹

Študijný program: Krajinárstvo, 4.ročník

MOŽNOSTI ZAMEDZENIA NEGATÍVNEHO VPLYVU DRUHU *FALLOPIA JAPONICA* NA BREHOVÚ VEGETÁCIU

PREVENTION OF NEGATIVE IMPACT OF *FALLOPIA JAPONICA* ON THE RIVERBANK VEGETATION

Abstract

The invasive plant *Fallopia japonica* has negative impact on riverbank vegetation. The eradication and prevention system is a necessary solution to this problem. Our research is conducted on the Blatina River in Pezinok, Slovakia. We are applied two methods of eradication: mechanical and combined chemical-mechanical eradication. Both method of eradication described in this study does not affect the deterioration of bank erosion and opens the door to the restoration of potential natural vegetation.

Kľúčové slová

Invázne rastlinstvo, brehovú vegetáciu, odstraňovanie, potenciálna prirodzená vegetácia

1. Úvod

Táto práca hovorí o negatívnom vplyve invázných druhov rastlín na brehovú vegetáciu na Slovensku a o možnostiach jeho zamedzenia. Invázne rastliny sú nepôvodné taxóny, ktoré sa nekontrolovateľne šíria a potláčajú existenciu pôvodných druhov. Pri invázií nepôvodných druhov rastlín možno hovoriť o uchytení sa daného druhu v novej oblasti, o jeho pohybe, či pohybe nižšieho taxónu, a o jeho rozmnožovaní mimo územia svojho prirodzeného výskytu. [1]

2. Negatívny vplyv šírenia druhu *Fallopia japonica*

Negatívne dôsledky šírenia druhu *Fallopia japonica* možno rozdeliť na dve hlavné kategórie: environmentálne a ekonomické dôsledky. Nás pri výskume zaujíma dopad na životné prostredie, čiže environmentálny aspekt dôsledkov a vplyvov. Predmetom skúmania je teda hľadanie možností, ako zabrániť ich negatívne vplyvu. Daný druh negatívne ovplyvňuje a mení pôvodné druhové zloženie. V krátkom čase dokáže vytvoriť nové typy spoločenstiev. Vytvára súvislé porasty na brehoch vodných tokov. Takéto porasty zhoršujú svetlo-tepelné podmienky pre pôvodné druhy brehovej vegetácie a tým zamedzujú ich rast. Vďaka vodnému režimu ľahko obsadzujú nové lokality od pramennej oblasti po deltu. Porasty situované priamo na berme a na svahoch spôsobujú pre ich plytký koreňový systém pôdnu eróziu. Dôsledkom toho dochádza k podomieľaniu svahu vodou v oblasti brehovej čiary. Eróziu zosilňuje aj usychanie nadzemných častí v zimných mesiacoch, čím dochádza k obnaženiu a nespevneniu pôdneho povrchu. [2]

¹ Barbora, Vaseková, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovakia

3. Východiská výskumu

Výskum vychádzal z podkladov získaných v prvej etape terénnych meraní. Pri pozorovaniach sme dospeli k záverom:

- vegetačné fragmenty druhu *Fallopia japonica* sú transportované po toku za pričinenia vodného režimu
- vegetačné fragmenty druhu *Fallopia japonica* si dokážu zachovať schopnosť reprodukcie po dobu minimálne 4 týždňov, potom je nutné uchytenie fragmentu v substráte [3]
- po zachytení sa na brehovom okraji dokáže rastlina skrze vegetačný fragment založiť populáciu na novom stanovišti. [4]

Nadmerné a nekontrolovateľné rozširovanie druhu *Fallopia japonica* predstavuje riziko pre pôvodnú brehovú vegetáciu. Narušená môže byť biologická rovnováha a taktiež celková ekologická stabilita. [5]

4. Cieľ

Cieľom výskumu bolo overiť metódy eradikácie vybraného druhu na referenčnom úseku toku. Pri metódach sme postupovali na základe vopred zistených rastlinných predispozícií. [6] Na základe overených metód je možné určiť ďalší manažment zachádzania s daným inváznym druhom.

5. Lokalita výskumu

Výskum prebieha na toku Blatina v Pezinku, na Slovensku. Pri terénnych meraniach bol použitý prístroj Leica VIVA GPS locator. Zameraná bola prítomnosť druhu *Fallopia japonica*. Lokality, ktoré mali plošné pokrytie do 1m² boli zamerané bodovo. Ostatné lokality s rozšírením nad 1m² boli zamerané ako polygóny po obvodě porastu. Pri meraní sme postupovali od pramennej oblasti nadol. Dĺžka referenčného úseku bola 1km. Merania boli opakované v troch opakovaniach v rámci vegetačného obdobia rastliny. Zaznamenaná bola plošná pokryvnosť na oboch brehoch. Prirodzenú vegetáciu toku Blatina tvoria lužné lesy, v ktorých sú zastúpené viaceré druhy vyššieho rastlinstva ako jelša, topol biely a čerešne.

6. Eradikácia

Na referenčnom úseku toku Blatina sme uplatnili dva spôsoby eradikácie: mechanickú a kombinovanú chemicko-mechanickú eradikáciu.

6.1. Mechanické odstraňovanie

Ako prvý bol vykonaný mechanický spôsob odstránenia druhu *Fallopia japonica* skosením. Vybraná lokalita s plošným záberom cca 150m² bola pokosená. Lokalitu tvorili dve plochy jedna na pravom druhá na ľavom brehu toku Blatina. Zľahnuté časti rastlín boli ponechané na svojom mieste, neboli pohrabané. Pri kosení bola snaha, aby čo najmenej rastlinného materiálu bolo odnesených vodou po toku. Potrebné bolo eliminovať možnosť ďalšieho šírenia zakorenením vegetačných úlomkov.



Figure 1. Nový jedinec *Fallopia japonica* na území po mechanickom odstraňovaní

6.2. Kombinované chemicko-mechanické odstraňovanie

Ako druhý spôsob bol vykonaný kombinovaný chemicko-mechanický spôsob odstránenia druhu *Fallopia japonica*, v čase vegetačného vrcholu rastliny. Na vybranú lokalitu s plošným záberom cca 50m² bol aplikovaný postrek Roundup Biaktiv. Roundup Biaktiv bol vyvinutý pre potreby vodného hospodárstva a poľnohospodárstva. [7] Tento kombinovaný spôsob je svojím spôsobom ojedinelý. K mechanickému odstráneniu došlo až po odumretí nadzemných častí rastlín. Cieľom mechanického odstránenia v tomto prípade nebolo eliminovať postrekovanú plochu, ale vytvoriť optimálne svetelné a vlhkosťné podmienky pre rast prirodzenej bylinnej vegetácie.



Figure 2. Časť rastliny po vykonaní chemického postreku

7. Výsledky

Dôsledky mechanického odstraňovania boli merané v nasledujúcom vegetačnom období. Zaznamenaný bol vzrast novej populácie. Došlo k miernemu rozšíreniu zarastenej plochy do šírky. Zväčšila sa celková plocha. Vznikla jedna nová lokalita. Výhodou mechanického odstránenia druhu bol okamžitý účinok, šetrnosť riešenia vzhľadom na životné prostredie a ekonomická nenáročnosť riešenia. Aby bolo kosenie účinné treba ho niekoľko krát do roka zopakovať, najlepšie vždy 1x za 14 dní počas celého vegetačného obdobia. Rastliny sekáme buď pri báze byle alebo 10-15 cm pod

zemou, čím sa zničí aj koreňová hlava. V našom prípade sme aplikovali prvý spôsob nakoľko išlo o porast vo svahu.

Dôležitým zistením bolo, že účinnosť chemickej eradikácie je závislá od plochy postriekaných listov, nezávisle od koncentrácie roztoku. Čím väčšia plocha je orosená tým lepšie látka vnikne do rastliny. Roztok je najvhodnejší v koncentrácii 5%. Praktická aplikácia bola vo vrcholnom štádiu rastliny náročnejšia, lebo jedince dosahovali výšku 2,5m. V prípade uzatvorených porastov nie je možné dobre postriekať vnútorné časti porastu. Z praktického hľadiska je preto optimálnejšie odstraňovať rastlinu v začiatočnom štádiu vegetačného cyklu, kedy je plocha listov menšia a stačí orosiť menšiu plochu.

Ako vidíme na obrázku č. 3 vďaka odstráneniu odumretých rastlín nastala obnova bylinného porastu, pričom v porovnaní s čisto mechanickým odstraňovaním vzrast bylinnej etáže je pozastavený. Stav po eradikácii bol percentuálne vyhodnotený. Schopnosť znovu klíčiť mal priemerne každý tretí jedinec, čo v tomto vegetačnom štádiu predstavuje 1,5% pozorovanej plochy, zvyšných 98,6% plochy zostalo prázdnych. Po kombinovanom chemicko-mechanickom odstraňovaní sme zaznamenali 0% schopnosť znova klíčiť. Z toho uzatvárame, že došlo k odumretiu aj podzemných orgánov rastliny. Vyčistené plochy po chemickom odstránení inváznej rastliny začala nahradzovať prirodzená vegetácia ešte v tom istom roku. Kombinovaná chemicko-mechanická eradikácia je v tomto prípade účinnejšia.



Figure 3. Pokryvnosť porastu po mechanickej eradikácii



Figure 4. Pokryvnosť porastu po kombinovanej chemicko-mechanickej eradikácii

Pre overenie dôsledkov eradikácie na stabilitu brehov bola vykonaná pôdna sonda na dvoch vybraných lokalitách. Jedna plocha bola vytýčená na mieste po mechanickej eradikácii a druhá po kombinovanej chemicko-mechanickej eradikácii. Z obidvoch plôch bola odobratá koreňová vzorka. Následne bola zhodnotená životaschopnosť koreňového systému a jeho stabilizačná funkcia vzhľadom na brehovú eróziu. Obidva spôsoby eradikácie nemali v našom prípade negatívny vplyv na brehovú eróziu.

8. Záver

Invázne rastliny v brehovej vegetácii majú negatívny vplyv na stabilitu brehov a na prirodzenú potenciálnu vegetáciu. [8] Najlepším riešením ako potláčať ich výskyt je eradikácia. Optimálne je odstraňovať rastlinu v začiatočnom štádiu vegetačného cyklu, kedy je plocha listov menšia a stačí orosiť menšiu plochu. Výsledok je potom ekologicky a ekonomicky výhodnejší. Po chemickej eradikácii je potrebné na jeseň odstrániť odumreté zvyšky rastlín, aby boli vytvorené optimálne svetelné a vlhkostné podmienky pre znovuoobnovenie prirodzenej potenciálnej vegetácie.

Pod'akovanie

Článok vznikol vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja a projektu VEGA 1/0068/19.

Literatúra

[1] CVACHOVÁ, A., GOJDIČOVÁ, E. “*Usmernenie na odstraňovanie invázných druhov rastlín,*” Štátna ochrana prírody SR. Centrum ochrany prírody a krajiny. Banská Bystrica. p. 18. 2003, ISBN 80-89035-25-6.

[2] VASEKOVÁ, B. “Relation between invasive plants and river,” In 29. konferencia mladých hydroológov, 16. konferencia mladých vodohospodárov, 18. konferencia mladých meteorológov a klimatológov: zborník súťažných prác mladých odborníkov. Bratislava, SR, 9. 11. 2017. Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav, 2017, CD-ROM, p.9. ISBN 978-80-88907-95-4.

[3] VASEKOVÁ, B., NÉMETOVÁ, Z. KESZELIOVÁ, A., ŠTEFUNKOVÁ, Z. “Mapping invasive plants in riverbank vegetation,” In WMESS 2018: abstract collection book. World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium 2018. Prague, Czech Republic, 03-07 September, 2018. Prague : [s.n.], 2018, CD-ROM, p. 265

[4] VASEKOVÁ, B. “Rozširovanie invázných rastlín (*Fallopia japonica*, *Impatiens glandulifera*),” In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering: 27th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Geodesy and Cartography, Landscaping, Building Technology, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Theory and Environmental Technology of Buildings, Water Resources Engineering. 24. October 2018, Bratislava, Slovakia. Bratislava : Spektrum STU, 2017, s. 222-228. ISBN 978-80-227-4864-3.

[5] DAWSON, F. H., HOLLAND, D. “The distribution in bankside habitats of three alien invasive plants in the UK in relation to the development of control strategies,” In: Biology, Ecology and Management of Aquatic Plants. Springer Netherlands, 1999. p. 193-201.

[6] VASEKOVÁ, B. “Invasive plants and their eradication,” KOMVY 2017, KZEI, Bratislava, 2017, s. 150-156. ISBN 978-80-227-4749-3.

[7] VASEKOVÁ, B., MAJOROŠOVÁ, M. “Steps in the process of eradicating Fallopia japonica in areas close to river,” HydroCarpath 2017. Catchment Processes in Regional Hydrology: Experiments, Patterns and Predictions, Sopron: University of Sopron Press, 2017. – ISBN 978-963-359-092-8.

[8] MAJOROŠOVÁ, Martina. Inovatívne prístupy k mapovaniu inváznej vegetácie. In Advances in architectural, civil and environmental engineering [elektronický zdroj] : 25rd Annual PhD Student Conference on Architecture and Construction Engineering, Building Materials, Structural Engineering, Water and Environmental Engineering, Transportation Engineering, Surveying, Geodesy, and Applied Mathematics. Bratislava, SR, 28. 10. 2015. 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2015, CD-ROM, s. 279-283. ISBN 978-80-227-4514-7.

**THEORY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY
OF BUILDINGS**

Ing. Mária Frťalová¹

Študijný program: Teória a technika prostredia budov, ročník:4+

CHLADENIE PROCESOM ODPAROVANIA V HALOVÝCH OBJEKTOCH

EVAPORATIVE COOLING FOR HALLS INDUSTRIAL OBJECTS HOW DOES IT WORK AND WHAT IS THE BENEFIT?

Abstract

Evaporative cooling methods around long before the advent of mechanically based cooling and can be found in traditional architecture in hot and dry climates around the globe. Evaporative coolers work by adding water vapor to hot air which, through the process of evaporation, removes sensible heat from the air and effectively lower its temperature.

The use of water evaporation for decreasing air temperature is a well-known cooling technology and an environmental friendly application. Due to increase in the awareness of environmental problems resulting from greenhouse gas emissions, various applications of evaporative cooling have been extensively studied and used for industrial and residential sectors, such as, humidifier and evaporative cooler.

Kľúčové slová

experimentálne meranie, adiabatické chladenie, entalpia, relatívna vlhkosť, teplota

1. Úvod

Je známe, že ľudské telo sa ochladzuje potením – procesom, kedy je telesné teplo odvádzané odparovaním potu. Vysoká relatívna vlhkosť však znižuje rýchlosť odparovania a ľudské telo je tak dlhšiu dobu vystavené prehriatiu. Tento stav má za následok únavu, zníženie produktivity a vyššie riziko ochorení. Adiabatické chladenie znižuje teplotu v objekte, pričom ovplyvňuje taktiež vlhkosť vzduchu. Týmto spôsobom dokáže zaistiť komfortné podmienky v hale a eliminovať tak riziká ako napríklad prehriatie organizmu alebo jeho kolaps. Navyše prispieva k efektívnejšiemu prúdeniu vzduchu, čo ľudské telo v horúcich dňoch vníma pozitívne. Existujú prípady kedy teplota je vysoká a relatívna vlhkosť nízka. To znamená, že chladenie je efektívne práve pri vysokých teplotách. V mesiacoch ako je napr. apríl alebo október je veľa dní s teplotou okolo 20 °C a relatívna vlhkosť presahujúca 90 %, vtedy chladiaci odparovací systém dokáže v letnom období vytvoriť v ochladzovanom priestore klimatické podmienky ako v jesennom alebo jarnom období.

Pri návrhu a hlavne pri spustení vzduchotechnickej jednotky v klimatizovanom priestore je okrem tepelných a vlhkosťných záťaží potrebné poznať aj charakter samotného procesu. Softwarové vybavenie jednotiek umožní relatívne rýchle a presné nastavenie požadovaných parametrov, ktoré

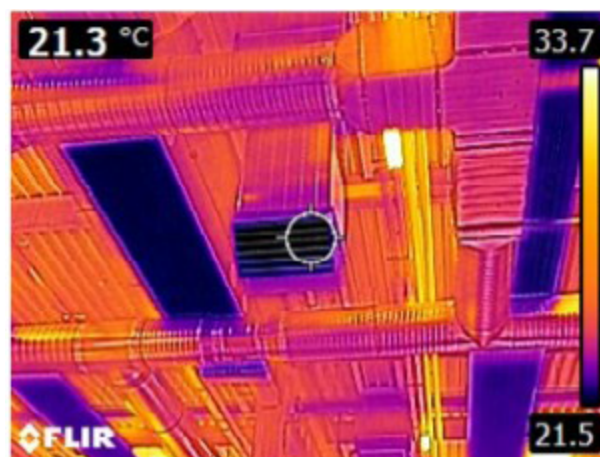
¹ Mária Frťalová, Ing., Katedra technické zariadení budov, STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

určil projektant. Následná optimalizácia nastavení slúži na dosiahnutie požadovanej kvality vnútorného prostredia budov.

2. Použité metódy v experimentálnom meraní

V rámci monitoringu teplotného stavu pracovného prostredia bola urobená termovízna analýza adiabatických chladičov, doplnkového stropného chladenia, ako aj jednotlivých výrobných liniek. Termovízna analýza využíva na stanovenie teploty povrchov emitovanú zložku tepelnej radiácie, ozn. W_e . Meranie tepelnej infračervenej radiácie tvorí základ bezkontaktného merania teploty. Infračervené (IR) obrazy zobrazujú len infračervenú časť spektra.

Na tepelnú pohodu výrazne vplýva aj rýchlosť prúdenia privádzaného vzduchu v bytovej pocitovej oblasti. Preto je dôležité zväžiť prúdový dosah distribučných prvkov a vhodnosť ich umiestnenia. Literatúra pripúšťa ochladzovanie prúdom vzduchu, ale v reálnych podmienkach rýchlosť nad 0,3 m/s začína byť vnímaná ako prejav tepelnej nepohody [1]. Tento pocit je samozrejme individuálny, čo jednému vyhovuje, môže iný vnímať ako nepríjemné.



Obr. 1: Teplota privádzaného vzduchu na výstupe z adiabatického chladiča



Obr. 2: Tepelný zisk citelným teplom z vonkajšieho prostredia

Distribúcia vzduchu v priemyselnom halovom objekte bola zabezpečená pomocou veľkoplošných výustiek. Požadované parametre prostredia: teplota a relatívna vlhkosť v priestore je 22 až 24 °C / 35 až 55 %. V riešených podmienkach je teplota privádzaného vzduchu (SUP) do klimatizovaného priestoru 22 °C. Vplyvom vnútorných tepelných ziskov dochádza k jej zvýšeniu na 23 °C pri relatívnej vlhkosti 42,3 %.

Na meranie psychrometrických parametrov boli použité datalogery TESTO 175 H1 osadené na 4 miestach v priestore. Výsledky boli odčítané na 40-minútovej báze. Pre meranie parametrov vonkajšieho vzduchu bol osadený dataloger TESTO H1 na severnej strane budovy. Osadeniu datalogerov je potrebné venovať zvýšenú pozornosť, aby nedošlo ku skresleniu meraných hodnôt, t. j. aby neboli pri zdroji tepla, vlhkosti, aby neboli v prievane a pod. Vzhľadom na skutočnosť, že nedochádza k výkyvom vnútorných tepelných ziskov, bol časový interval vyhodnotený ako primeraný tak, aby bol zachytený priebeh dennej smeny. Okrem psychrometrických meraní teploty a relatívnej vlhkosti sa realizovalo aj meranie rýchlosti prúdenia vzduchu v miestach pobytu a pohybu pracovníkov vo výške 1,50 m a 1,75 m nad podlahou. Z pohľadu Vyhlášky MZ SR č. 448/2007 Z. z. je prácu možno zaradiť do kategórie „1b“, t. j. ľahké strojné opracovanie s metabolickým výdajom $q_M = 81$ až 105 W/m^2 ; $M = 146$ až 190 W [2]. Pre letné podmienky sú v tabuľke č. 2 vyhlášky definované nasledovné optimálne podmienky: teplota v rozsahu 22 až 25 °C pri relatívnej vlhkosti vzduchu 30 až 70 % a rýchlosti prúdenia vzduchu v pracovnej oblasti do 0,3 m/s.

3. Merané hodnoty

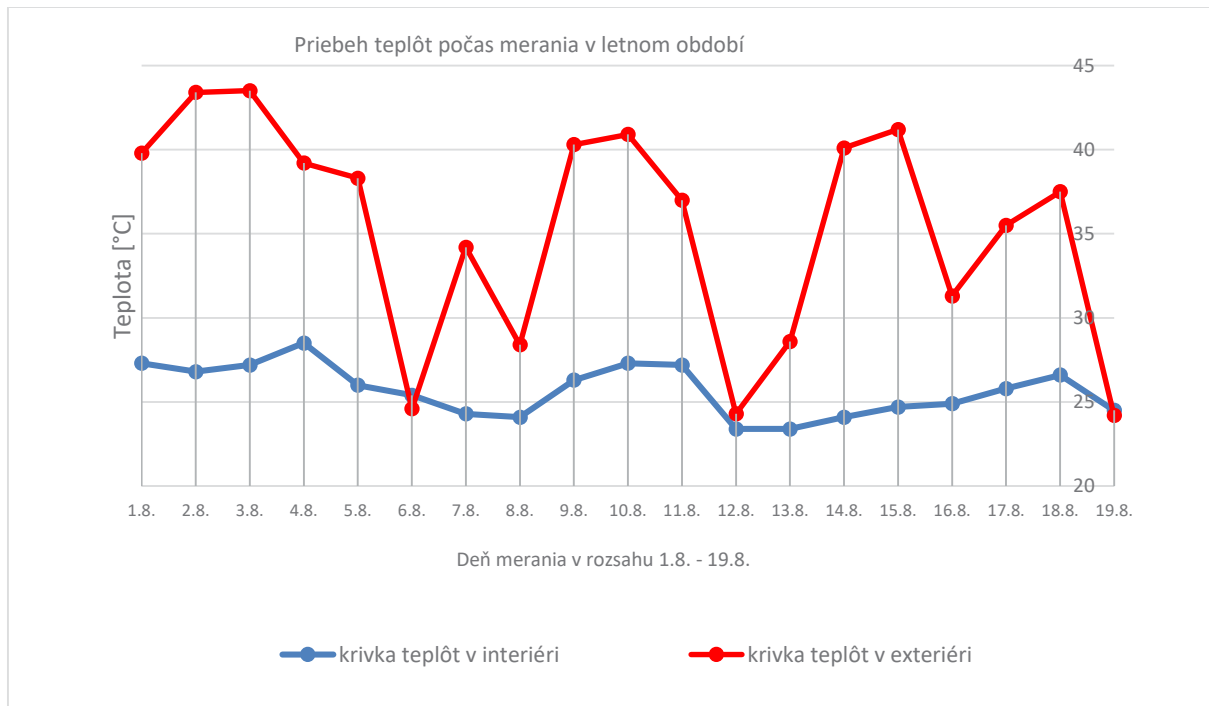
Namerané hodnoty boli spracované v tabuľkovej forme s následným prepočtom na špecifickú vlhkosť x (kg/kg_{sv}) a entalpiu h (J/kg_{sv}). Entalpia je vo všeobecnosti komplexnejším ukazovateľom kvality vnútorného prostredia z pohľadu psychrometrie.

| | | | Stav 1,2,3 v h-x diagrame | | |
|-------------------------|--------|-----------------------|---------------------------|---------|---------|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| Teplota | t | °C | 31 | 22 | 45 |
| Relatívna vlhkosť | ϕ | % | 40 | 89 | 25 |
| Špecifická vlhkosť | x | g/kg_{sv} | 11,4 | 15,0 | 15,0 |
| Entalpia | h | kJ/kg_{sv} | 60,5 | 60,5 | 84,3 |
| Hustota | ρ | kg/m^3 | 1,14 | 1,17 | 1,09 |
| Teplota vlhkého vzduchu | t_v | °C | 20,7 | 20,7 | 26,6 |
| Skutočný prietok | V_s | m^3/h | 164 311 | 160 368 | 172 865 |
| Normový prietok | V_n | m^3/h | 154 000 | 154 000 | 154 000 |
| Výkon | P | kW | | 0,0 | 1225,5 |
| Odparená voda | q_w | kg/h | | 674,7 | 0 |

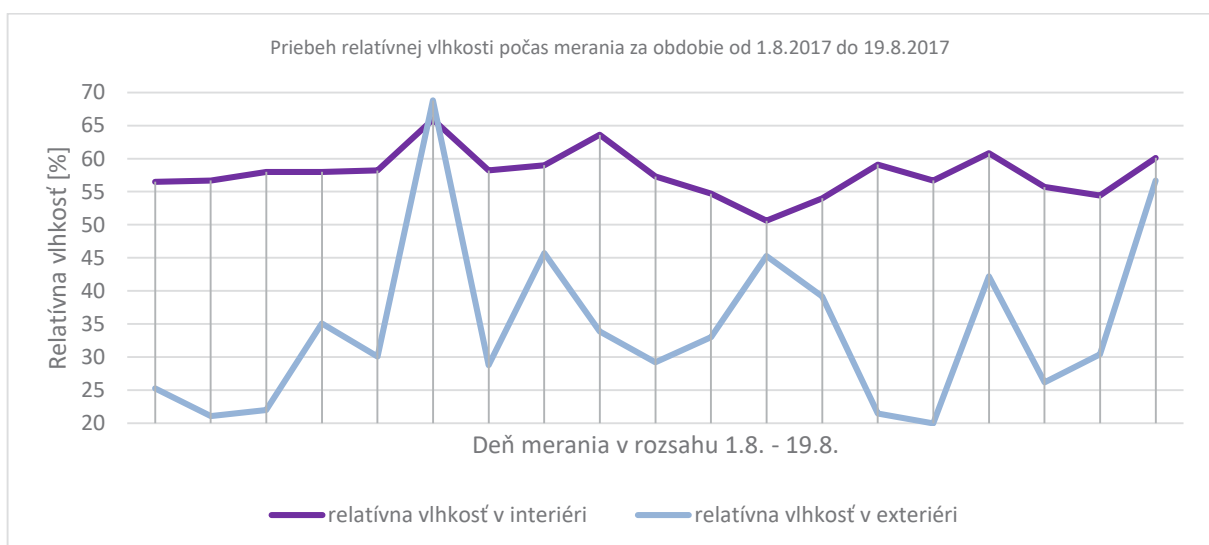
Tab. 1: Merané a vypočítané parametre vnútorného prostredia

Dáta z datalogerov boli spracované formou grafov a tabuliek v sledovanom období. Výstupy z meraní v priestore boli porovnané s priebehom teplôt a vlhkostí v exteriéri. Je dôležité povedať, že sa jedná o veľký halový priestor s veľkou tepelnou zotrvačnosťou, kde sa teplotné a vlhkosťné zmeny prejavujú s odstupom cca 2 až 3 hodín, keď je nastolená nová rovnováha. Osadenie datalogerov v

blízkosti strojov alebo technológie s vývinom citeľného tepla môže vyvolať isté skreslenia meraní. Nehovoriac o zásadnom vplyve ľudského faktora. Momentálny okamžitý pocit prípadnej tepelnej nepohody pracovník rieši otvorením okien, resp. brán do exteriéru. Okrem prievanu je priestor zaťažovaný aj horúcim vzduchom v exteriéri, ako je to zrejmé z priložených IR obrázkov (Obr. 2).

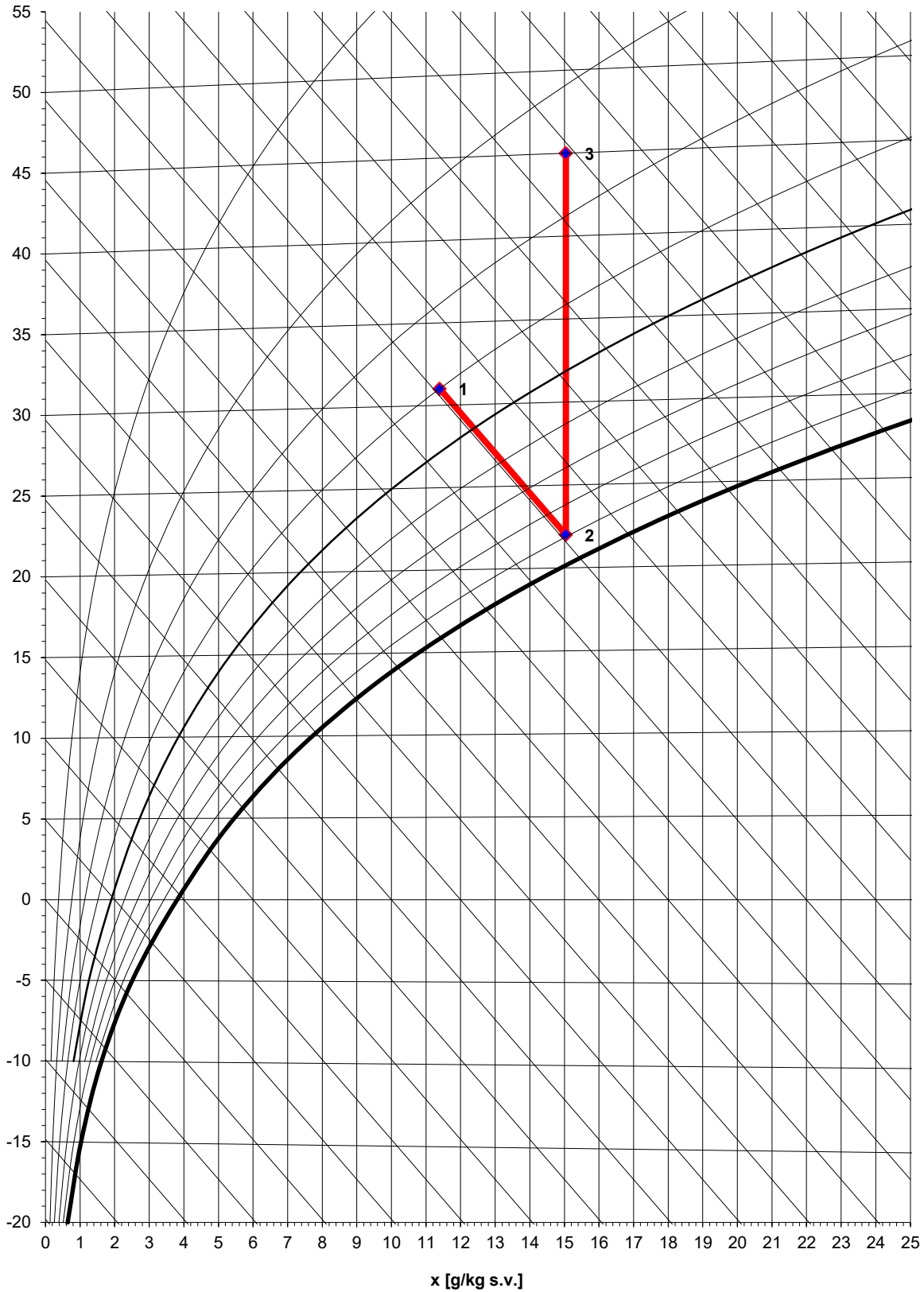


Graf 1: Priebeh teploty v exteriéri a interiéri halového objektu t_e a t_i



Graf 2: Priebeh relatívnej vlhkosti v interiéri a exteriéri halového objektu φ_i a φ_e

4. Psychrometrický diagram podľa Molliera



Obr. 3: Mollierov h-x diagram [3]

5. Záver

Na základe zistených skutočností je možno konštatovať, že vo veľkých halových priemyselných objektoch, kde je možnosť veľkej tepelnej zotrvačnosti, je možno pomocou adiabatického chladenia dodržať požadované tepelno-technické parametre a efektívne eliminovať tepelnú záťaž. Avšak očakávať, že adiabatické chladenie dokáže udržať presné parametre vnútorného prostredia bez ohľadu na vonkajšie podmienky nie je reálne. Významnou mierou sa chladiaci výkon so stúpajúcou vonkajšou relatívnou vlhkosťou znižuje. Rovnako je potrebné povedať, že hystéza nastavení teploty a vlhkosti je pomerne široká ± 3 až 5% na obe strany. Na druhú stranu je však potrebné povedať aj to, že je to otvorený systém, ktorý v letnej prevádzke pracuje iba s vonkajším vzduchom (ODA). Rovnako je potrebné konštatovať, že hoci tento spôsob chladenia je závislý od vonkajších poveternostných podmienok, stále dokáže udržiavať parametre vnútorného prostredia ako ich definuje legislatíva. Vhodnými distribučnými prvkami a ich správnym rozmiestnením je možno docieľiť požadované rýchlosti prúdenia vzduchu v pobytovej oblasti. Ak aj dochádza k miernym odchýlkam od definovaných hodnôt, ide skôr o letné extrémny, keď vonkajšia teplota vystupuje nad $33\text{ }^{\circ}\text{C}$, resp. je po daždi a vonkajšia relatívna vlhkosť je 100% .

Literatúra:

- [1] Vyhláška MZ SR č. 259/2008 Z. z. o podrobnostiach o požiadavkách na vnútorné prostredie
- [2] Vyhláška MZ SR č. 544/2007 Z. z. o podrobnostiach o ochrane zdravia pred záťažou teplom a chladom pri práci (str. 3913 – 3934)
- [3] <http://www.aldacs.com/principles.html>

Soňa Gažíková¹

Študijný program: Teória a technika prostredia budov, 3. ročník

VYUŽITIE OTVORENÉHO GEOTERMÁLNEHO SYSTÉMU PRE CENTRALIZOVANÉ ZÁSOBOVANIE TEPLOM NA SLOVENSKU

USAGE OF THE OPEN GEOTHERMAL SYSTEM FOR CENTRALIZED HEAT SUPPLY IN SLOVAKIA

Abstract

In Slovakia were realized approximately 171 geothermal drills with the borehole head temperature from 15,7 °C to 126 °C. Most of these areas have a temperature of the geothermal water suitable for space heating, preparing hot water and for agriculture and for balneological purposes. In this paper I would like to point out the solution of a problem of centralized heat supply for the residential area in Veľký Meder. The cooled geothermal waste water is used for heating of the health center after usage for the space heating. And the partially cooled geothermal water is used for the filling swimming pools in spa Thermal Corvinus.

Kľúčové slová

centralizované zásobovanie teplom, geotermálna energia, vychladená geotermálna voda, geotermálny energetický systém, výroba tepla, zdroj tepla

1. Úvod

Na území Slovenska sú výborné predpoklady pre využívanie geotermálnej energie (GE). Avšak nejedná sa o koncentrovaný zdroj energie, ale o pomerne nepravidelne rozložený druh energie na celom území Slovenskej republiky. Na Slovensku je vyhlbených približne 171 geotermálnych vrtov. Teploty geotermálnej vody (GTV) na hlave vrtov dosahujú 15,7 – 126 °C. Výdatnosť GTV na hlavách vrtov sa pohybuje od 0,1 – 105 l/s [1].

Od roku 1989 sa na Slovensku využíva geotermálna energia približne v 26 lokalitách. Celková výdatnosť týchto zdrojov je 105 l/s. V súčasnosti sa geotermálna energia na Slovensku využíva najmä na:

- rekreačné účely – termálne kúpaliská a aquaparky – teplota vody je od 25 °C,
- v poľnohospodárstve – vykurovanie skleníkov, fóliovníkov, sušiarne plodín, rybné hospodárstva – teplota vody je 25 -90 °C,
- na vykurovanie budov – vyžaduje teplotu vody 50 -100 °C,
- tepelné čerpadlá – pre vykurovanie (VYK) a prípravu teplej vody (TV)
- priemyselné využitie – chladiarenské a mraziarenské účely – teplota GTV je nad 100 °C [2].

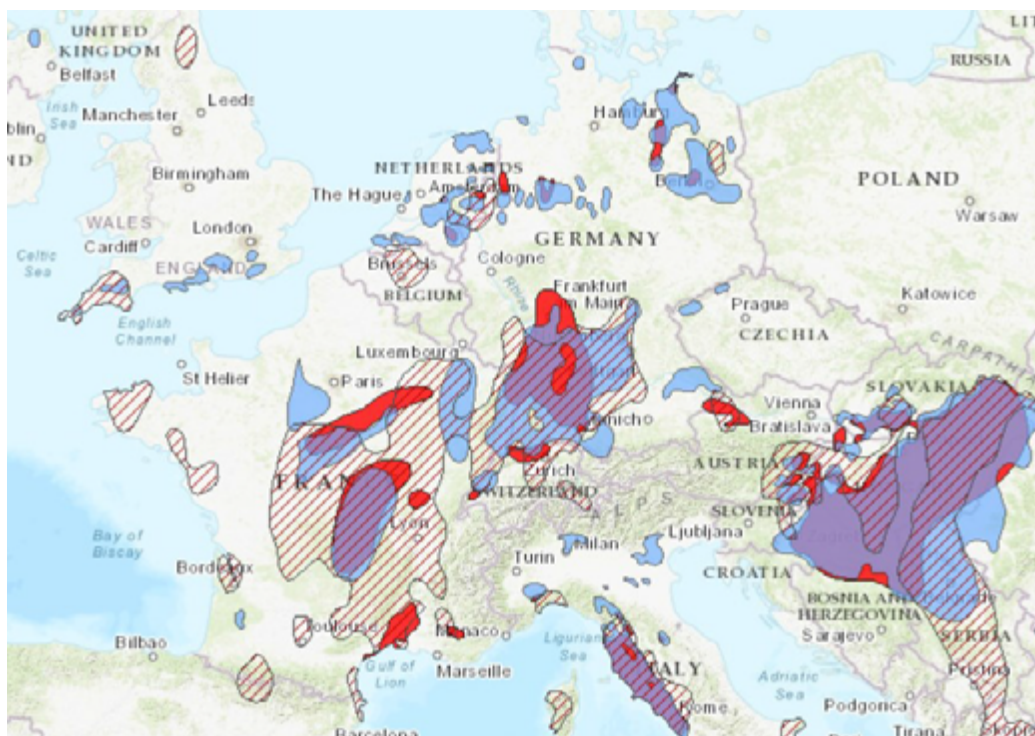
¹ Soňa Gažíková, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta

2. Využitie geotermálnej energie pre centralizované zásobovanie teplom

Vykurovanie objektov pomocou GE je celosvetovo jeden z najrozšírenejších spôsobov jej využitia, predstavuje až 50 % využitia geotermálnej energie vo svete. Všeobecne je vhodná teplota GTV pre tento spôsob využitia už od 40 °C (pre nízkokotepelné systémy), ale vhodnejšie je využívať geotermálnu vodu s teplotami nad 60 °C. Pri GTV na vykurovanie objektov je veľmi dôležité brať ohľad na jej chemické zloženie, aby sme vedeli posúdiť aký materiál je vodné zvoliť na potrubia a ostatné strojné zariadenia, tak aby sa čo najviac predišlo ich korózii a tvorbe inkrustov [3].

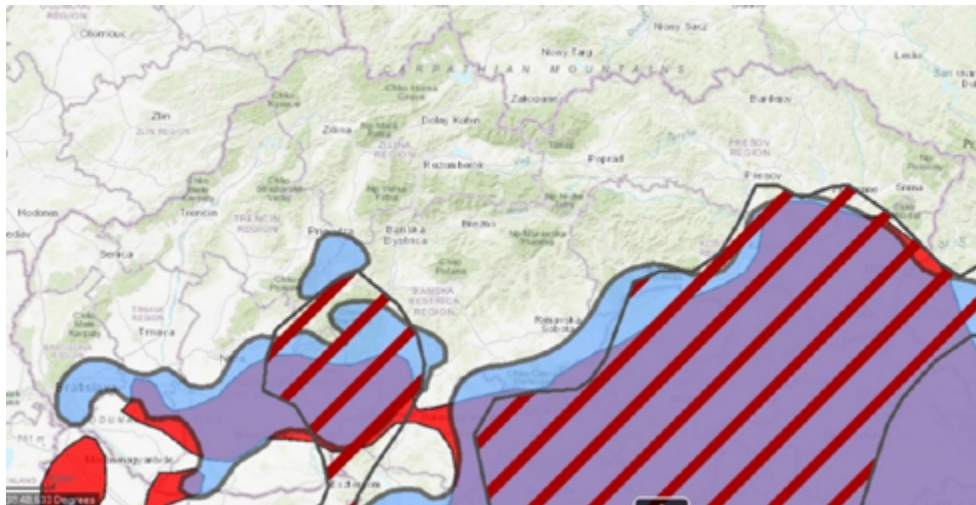
2.1 Potenciál pre centralizované zásobovanie teplom pomocou geotermálnej energie

Na nasledujúcich 2 obrázkoch (1 a 2) sa nachádzajú mapy so zobrazením oblastí s potenciálom pre GE pre systémy centralizovaného zásobovania teplom (SCZT) – vykurovanie a prípravu TV pre objekty v centrálnej Európe a na Slovensku.



Obr. 1: Geotermický potenciál pre vykurovanie pre Centrálnu Európu [4].

Na obrázku 1 je zobrazená mapa pre Centrálnu Európu, na ktorej môžeme vidieť oblasti s GTV, ktorých teplota je vhodná pre využitie v rámci SCZT. Modrou farbou sú zobrazené oblasti s teplotami GTV nad 50 °C v hĺbkach 1 000 m, červenou farbou sú zobrazené oblasti GTV s teplotou nad 90 °C v hĺbkach nad 2 000 m, fialovou sú zobrazené oblasti, v ktorých sa prekrývajú obe spomenuté možnosti. Červenou pruhovanou je na mape zobrazený tepelný tok s hustotou nad 90 W/m². Toto isté farebné rozlíšenie bude platiť aj pre nasledujúci obrázok (obr. 2), na ktorom budú bližšie zobrazené oblasti s takýmto potenciálom pre Slovensko.



Obr. 2: Geotermický potenciál pre vykurovanie na Slovensku [4].

Na obrázku 2 je zobrazený potenciál GE pre využívanie GTV pre SCZT na Slovensku. Ako môžeme vidieť, najviac vhodné oblasti sa nachádzajú najmä v Nitrianskom a Košickom kraji, ale taktiež vhodné podmienky sú aj v ostatných krajoch s výnimkou Žilinského kraja a s minimálnym zastúpením v Prešovskom a Trenčianskom kraji.

2. 2 Účinnosť sústavy centralizovaného zásobovania teplom

Účinnosť SCZT sa hodnotí posúdením faktora primárnej energie $f_{P,dh}$ konkrétnej sústavy centralizovaného zásobovania teplom. Faktor sústavy centralizovaného zásobovania teplom je definovaný ako podiel vstupu množstva primárnej energie do sústavy $E_{P,in}$ a množstva tepla Q_{del} dodaného po hranicu zásobovaných budov, t. j. na primárnu stranu odovzdávacích staníc tepla (OST) po hranicu zásobovaných budov [5]. Výpočet faktora primárnej energie je nasledovný:

$$f_{P,dh} = E_{P,in} / Q_{del} \quad [-] \quad (1)$$

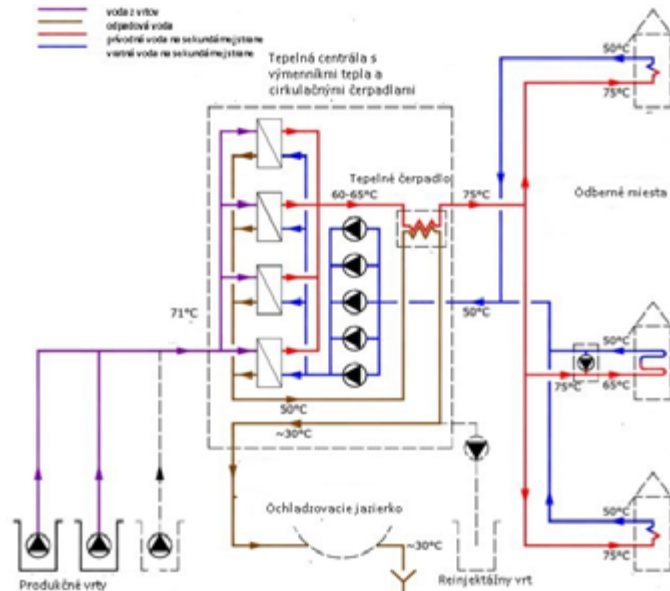
Kde:

$f_{P,dh}$ – faktor primárnej energie [-]
 $E_{P,in}$ – množstvo primárnej energie vstupujúcej do SCZT [MWh]
 Q_{del} – množstvo tepla dodaného na hranicu zásobovaných budov do OST [MWh] [5].

2. 3 Centralizované zásobovanie teplom pomocou geotermálnej energie

Sústavy pre diaľkové (alebo aj CZT) GE sa rozdeľujú na tri základné časti. Prvú časť tvoria produkčné vrty – zdroje OZE, ktoré zásobujú GTV tepelnú centrálu. GTV je do tepelnej centrálly dopravovaná pomocou čerpadiel cez zaizolované rozvodné potrubia pod úrovňou okolitého terénu. Druhú časť tvorí tepelné centrálly, v ktorej sa nachádzajú výmenníky tepla (VT), pri ktorých je každý VT napojený na jeden odberný okruh. V niektorých prípadoch sa kvôli šetreniu so systémom využíva vo výmenníkoch tepla aj druhý krát ochladená voda s odberných miest (avšak v takomto prípade musí

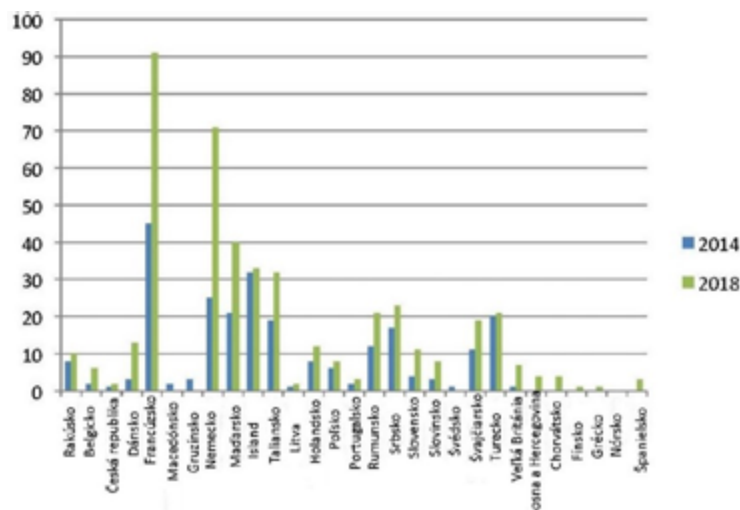
byť v systéme zahrnuté aj tepelné čerpadlo) a následne sa až potom tepelne využitá GTV zneškodňuje v recipientoch cez vyhladzovací kanál alebo sa pomocou reinjektážnych vrtov vracia naspäť do pôvodného horninového podložia t. j. pôvodných vodonosných kolektorov. Tretiu časť celej sústavy tvoria jednotlivé odberné miesta s rôznymi výpočtovými teplotnými spádmi.[6].



Obr. 3: Schéma pre SCZT s dominantným postavením GE [6].

Na obrázku 3 je zobrazená schéma SCZT, kde primárnym energetickým zdrojom sú 3 geotermálne vrty. Fialovou farbou sú znázornené potrubné rozvody z produkčných vrtov do tepelnej centrály na primárnej strane, hnedou farbou je zaznačená tepelne využitá GTV (odpadová). Červenou a modrou farbou je znázornená sekundárna strana, v ktorej je zvyčajne teplotnosnou pracovnou látkou vykurovacia voda, teda iná kvapalina ako geotermálna voda. Červenou je znázornený prívod a modrou je znázornené vratné potrubie do vykurovacích sústav stavebných objektov. Teploty v sekundárnych rozvodných potrubíach sú orientačné, kvôli znázorneniu ochladzovania GTV v doskových VT [6].

Na nasledujúcom obrázku (obr. 4) je zobrazený počet realizovaných systémov centralizovaného zásobovania teplom pomocou geotermálnej energie pre Európu v rokoch 2014 a 2018.



Obr. 4: Počet systémov SCZT pomocou GE v Európe v rokoch 2014 a 2018 [7].

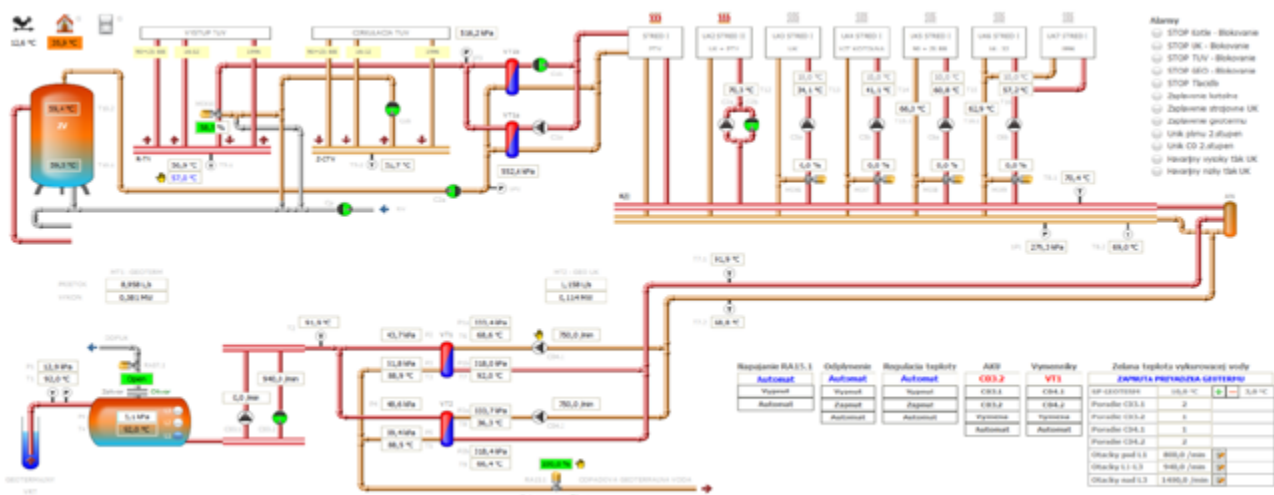
Na obrázku 4 môžeme vidieť počet systémov SCZT s využívaním GE, ktoré boli zrealizované v Európskej únii v rokoch 2014 (modrou) a 2018 (zelenou). Môžeme usúdiť, že ich počet z roka na rok narastá. Najväčší nárast v počte týchto systémov v priebehu 4 rokov zaznamenalo Francúzsko – zo 43 na 91 systémov a Nemecko – z 23 na 71 systémov. V tomto grafe je taktiež zakreslené aj Slovensko a tu môžeme konštatovať, že v roku 2014 boli u nás využívané 4 systémy pre SCZT pomocou geotermálnej energie a v roku 2018 ich počet narástol na 11 systémov [7].

3. Využitie geotermálnej energie v SCZT v meste Veľký Meder

V roku 2015 bol vo Veľkom Mederi realizovaný geotermálny vrt VM-1 na nádvorí teplovodnej kotolne, keďže pôvodný zdroj tepla už bol nedostačujúci (morálne aj technicky zastaralý). Hĺbka vrtu je 2 450 m, s teplotou na hlave vrtu $\theta = 98\text{ °C}$, výdatnosťou pri exploatacii čerpaním hlbinným čerpadlom $m = 16\text{ l/s}$ a mineralizáciou GTV3 600 mg/l. Doplnkovými alebo špičkovými zdrojmi tepla v kotolni okrem geotermálneho vrtu po rekonštrukcii sú 3 teplovodné skriňové kotle na zemný plyn s tlakovými horákmi a tepelným výkonom $Q_1 = 1\ 000\text{ kW}$ a dva moderné skriňové kotle na zemný plyn s tlakovými horákmi a tepelným výkonom $Q_2 = 1\ 600\text{ kW}$, takže súčtový tepelný výkon kotolne je $Q_c = 7\ 200\text{ kW}$ [8].

3.1 Technické riešenie

Geotermálna voda (GTV) z vrtu je zo začiatku voľným prelivom a vlastným tlakom dopravovaná do akumuláčnej a odplyňovacej nádrže s objemom 10 m^3 , v ktorej sa následne odplyní a ďalej je dopravovaná do dvoch doskových VT typu G-MART s tepelným výkonom $Q = 1\ 549\text{ kW}$. Vo výmenníkoch tepla VT1 a VT2 GTV odovzdáva svoju energiu teplonosnej látke – vykurovacej vode, ktorá zásobuje rozdeľovač a zberač, z ktorého sú napojené jednotlivé odberné miesta podľa obr. 5 – pravá horná časť obrázka.



Obr. 5: Dráha GTV od vrtu až ku výmenníkom tepla VT1 a VT2 a do odberných miest [9].

Sekundárna teplonosná látka zostupuje z výmenníkov tepla VT1 a VT2 a zabezpečuje teplom rozdeľovač a zberač, z ktorého sú napojené jednotlivé odberné miesta, 1 600 bytov, materská škôlka,

základná škola, detský domov, kultúrne stredisko, poliklinika. Predohrev teplej vody sa uskutočňuje v dvoch doskových výmenníkoch tepla VT1a a VT1b s tepelným výkonom $Q = 400 \text{ kW}$ a potom sa akumuluje v stojatej akumuláčnej nádobe s objemom 4000 litrov. Z nej je zásobované sídlisko teplou vodou. Pohľad na výmenníky tepla VT1 a VT2 je zobrazený na obr. 6.



Obr. 6: Pohľad na výmenníky tepla VT1 a VT2 [9].

Ochladená tepelne využitá GTV po ochladení v doskových výmenníkoch tepla VT1 a VT2 pokračuje potrubným rozvodom do areálu termálneho kúpaliska, pričom pred vstupom do areálu kúpaliska sa potrubie rozvetvuje a je na neho napájané potrubie, ktoré zásobuje teplom blízku polikliniku. Následne je geotermálna voda využitá v termálnom kúpalisku [9].

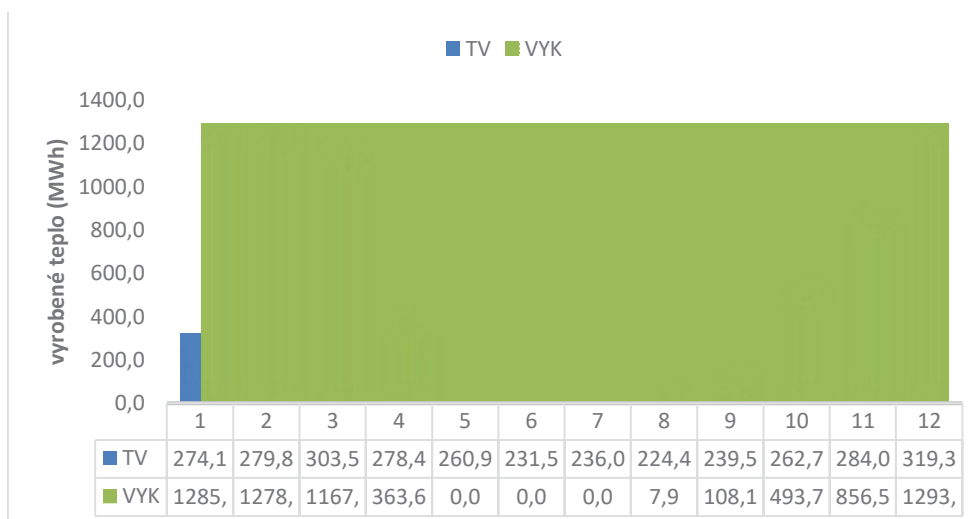
3. 2 Výroba tepla v zdroji tepla za rok 2018

V nasledujúcej tabuľke (tab. 1) a grafoch (obr. 7 a 8) sú znázornené hodnoty vyrobeného tepla pre vykurovanie a prípravu teplej vody v kotolni v roku 2018 v jednotlivých mesiacoch.

Tab. 1: Výroba tepla pre prípravu teplej vody a vykurovanie vo Veľkom Mederi v roku 2018 [9].

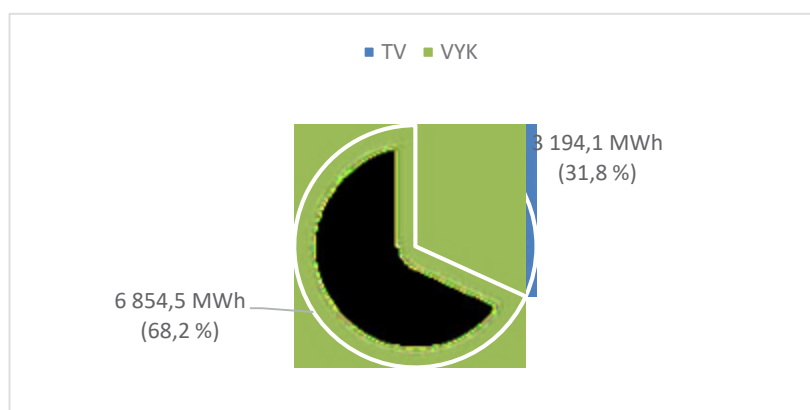
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | spolu |
|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|---------|
| TV | 274,1 | 279,8 | 303,5 | 278,4 | 260,9 | 231,5 | 236,0 | 224,4 | 239,5 | 262,7 | 284,0 | 319,3 | 3194,1 |
| VYK | 1285,9 | 1278,2 | 1167,5 | 363,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 7,9 | 108,1 | 493,7 | 856,5 | 1293,1 | 6854,5 |
| spolu | 1560,0 | 1558,0 | 1471,0 | 642,0 | 260,9 | 231,5 | 236,0 | 232,3 | 347,6 | 756,4 | 1140,5 | 1612,4 | 10048,6 |
| ZP | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| GE | 1560,0 | 1558,0 | 1471,0 | 642,0 | 260,9 | 231,5 | 236,0 | 232,3 | 347,6 | 756,4 | 1140,5 | 1612,4 | 10048,6 |

V tabuľke 1 sú znázornené hodnoty pre vyrobené teplo v kotolni vo Veľkom Mederi v MWh. Pričom hodnoty vyrobeného tepla sú z dvoch typov zdrojov – geotermálnej energie (GE) a zemného plynu z kotlov (ZP). Môžeme konštatovať, že v roku 2018 nebolo potrebné dať do prevádzky kotle na prípravu teplej vody (TV) ani pre vykurovanie (VYK), podiel vyrobenej energie z geotermálneho vrtu VM-1 bol dostačujúci.



Obr. 7: Vyrobené teplo pre prípravu teplej vody a vykurovanie v kotolni v MWh [9].

Na obrázku 7 sú znázornené hodnoty vyrobeného tepla v jednotlivých mesiacoch v tepelnej centrále vo Veľkom Mederi podľa tabuľky 1. Modrou farbou sú znázornené hodnoty pre prípravu teplej vody (TV) a zelenou pre vykurovanie (VYK).



Obr. 8: Celková potreba tepla pre VYK a prípravu TV v roku 2018 z geotermálneho zdroja [9].

Celkovo sa v roku 2018 vyrobilo z geotermálneho zdroja 10 048,5 MWh energie, z toho 3 194,1 MW na prípravu teplej vody (31,8 %) a pre potreby vykurovania to bolo 6 854,5 MWh (68,2%).

4. Záver

V rámci Slovenska máme viacero oblastí, ktoré sú vhodné pre SCZT pomocou geotermálnej energie. Momentálne je v prevádzke na Slovensku 11 takýchto systémov.

V roku 2015 bol vybudovaný vo Veľkom Mederi geotermálny vrt, ktorý sa využíva pre CZT pre sídlisko aj pre polikliniku, pričom tepelne využitá ochladená GTV sa využíva ďalej v bazénovom

hospodárstve. V roku 2018 bol geotermálny vrt už natoľko využívaný, že nebolo potrebné do prevádzky zaradiť aj kotle na zemný plyn, ktoré sú v kotolni taktiež umiestnené.

Využívaním OZE v podobe GE sa ušetrí nemalé množstvo klasických energetických zdrojov zemného plynu. Do okolia sa nevypustia škodliviny, ktoré by vznikli spaľovaním klasických primárnych energetických zdrojov. Splnia sa záväzky k smernici Rady Európy európskeho parlamentu č. 31/2010 o energetickej efektívnosti budov (20 + 20 + 20).

Táto práca bola podporovaná Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR prostredníctvom grantu VEGA 1/0807/17.

5. Literatúra

- [1] BARTKO, L. - BADIDA, M. - HORBAJ, P, Konkoly, J (2014) Využitie geotermálnej energie v podmienkach Slovenska, Transfer inovácií, Volume 29, Pages:304-311, ISSN: 1337-7094
- [2] FENDEK, M. – BÁGELOVÁ, A. – FENDEKOVÁ, M. 2011. Geotermálna energia vo svete a na Slovensku. In. *Podzemná voda*. ISSN 1335-1052, 2011. Roč. 17, č. 1, s. 74-83.
- [3] YÜRÜSOYA, M. - KEÇEBAŞ, A. *Advanced exergo-environmental analyses and assessments of a real district heating system with geothermal energy*. In: *Applied Thermal Engineering*. 2017. Číslo: 113. Strany: 449–459. ISSN: 1359-4311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.054.
- [4] GEODH. *MBFSZ maps*. [online]. 2015. Dostupné na internete: https://map.mbfsz.gov.hu/geo_DH/.
- [5] ROUMI, S. a kol. *Direct applications of geothermal energy: economic and environmental assessment*. In: *42nd workshop on geothermal reservoir energy*. Stanford, Kalifornia. 13. – 15. februára 2017. SGP-TR-212.
- [6] KEÇEBAŞA, A. - YABANOVAB, I. - YUMURTACIC, M. *Artificial neural network modeling of geothermal district heating system through exergy analysis*. In: *Energy Conversion and Management*. 2012. Číslo: 64. Strany: 206–212. ISSN: 0196-8904. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.06.002.
- [7] GeoDH. *Geothermal DH potential in Europe*. [online]. 2014. Dostupné na internete: <http://geodh.eu/wp-content/uploads/2014/11/GeoDH-Report-D-2.2-final.pdf>.
- [8] TAKÁCS J. – GAŽÍKOVÁ, S. – DERZSI, I. : *Otvorený geotermálny energetický systém pre zásobovanie teplom v meste Veľký Meder*. Vypáňení, větrání a instalace 2/2019.
- [9] Podklady z prevádzky kotolne Stred vo Veľkom Mederi MPBH spol. s r.o.

Veronika Gombošová¹

Teória a technika prostredia budov, 2. ročník

VYUŽITIE GARANTOVANEJ ENERGETICKEJ SLUŽBY V PRAXI

THE USE OF ENERGE PERFORMANCE CONTRACTING IN PRACTICE

Abstract

Energy saving is among the most frequent topic in building and industry management. The aim of this report is to define the possibilities of financing and implementing energy efficiency measures through Energy Performance Contracting (EPC) provided by Energy Service Companies (ESCO). The energy efficiency measures implemented through EPC provide the beneficiary with benefits in the form of reduced energy costs and an extended operation lifetime of technologies, technical equipment and buildings themselves. The risk associated with the payback period of investment and profitability of the measures is assumed by ESCO.

Kľúčové slová

garantovaná energetická služba (GES), energetická efektívnosť, úspora

1. Energetická služba

Pod pojmom energetická služba rozumieme službu, ktorá je poskytovaná na základe zmluvy. Zmluva sa uzatvára medzi poskytovateľom energetickej služby a jej prijímateľom. Vďaka tejto zmluve dochádza k overiteľným a merateľným alebo k odhadnuteľným úsporám energie, čím sa zlepšuje energetická efektívnosť. Finančné alebo materiálne výhody pre prijímateľa aj poskytovateľa sú dosiahnuté vďaka energetickejšej technológii alebo činnosti, ktorá zahŕňa prevádzku, údržbu alebo kontrolu potrebnú na poskytnutie energetickej služby [1].

Energetickú službu možno poskytovať ako podpornú energetickú službu alebo garantovanú energetickú službu. Pri poskytovaní energetickej služby sa vychádza zo zákona č. 321/2014 Z.z. o energetickej efektívnosti a o zmene a doplnení niektorých zákonov [1]. Pre úspešnú realizáciu energetickej služby je veľmi dôležité, aby jej prijímatelia dodali všetky potrebné materiály poskytovateľovi energetickej služby. Prijímateľ je okrem toho povinný odovzdať priestory a pracoviská pre realizáciu navrhnutých opatrení, zamedziť vstupu neoprávnených osôb, zabezpečiť dodávku elektriny, vody a taktiež umožniť využívanie sociálnych zariadení, šatní a priestorov pre skladovanie materiálov potrebných pre realizáciu opatrení. Prijímateľ je povinný vykonať všetky potrebné opatrenia pre odstránenie problémov, ktoré sa vyskytnú v dotknutých priestoroch (napr. výskyt nebezpečných látok, o ktorých nebol poskytovateľ energetickej služby informovaný pred začatím realizácie opatrení). Vzhľadom na to, že sa jedná o staršie budovy, jedným z najväčších problémov pre prijímateľa je častokrát poskytnutie dokumentácie skutočného vyhotovenia. Toto je jedna z možných príčin sťaženia a predĺženia realizácie energetickej služby.

¹ Ing. Veronika Gombošová, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra TZB, Radlinského 11, 811 05 Bratislava

2. Definícia energetickej služby

2.1 Definícia podľa smernice 2012/27/EU

Energetická služba je podľa Smernice 2012/27/EU definovaná ako zmluva o energetickej efektívnosti. Je to dohoda na zmluvnom základe uzatvorená medzi prijímateľom a poskytovateľom opatrenia na zlepšenie energetickej efektívnosti objektu, ktorá sa overuje a monitoruje počas celého trvania zmluvného vzťahu a podľa ktorej sa za investície na prácu, dodávku a službu do daného opatrenia platí na základe zmluvne dohodnutej úrovne zlepšenia energetickej efektívnosti alebo iného dohodnutého kritéria energetickej efektívnosti, napríklad finančné úspory [2].

2.2 Definícia podľa Zákona č. 321/2014 Z.z. o energetickej efektívnosti

Energetická služba je služba poskytovaná na základe zmluvy uzatvorenej medzi poskytovateľom energetickej služby a prijímateľom energetickej služby, v dôsledku ktorej dochádza k preukázateľne overiteľným a merateľným alebo k odhadnuteľným úsporám energie a k zlepšeniu energetickej efektívnosti a ktorá umožňuje dosiahnuť finančnú alebo materiálnu výhodu pre všetky zmluvné strany získanú energeticky účinnejšou technológiou alebo činnosťou, ktorá zahŕňa prevádzku, údržbu alebo kontrolu potrebnú na poskytnutie energetickej služby [1].

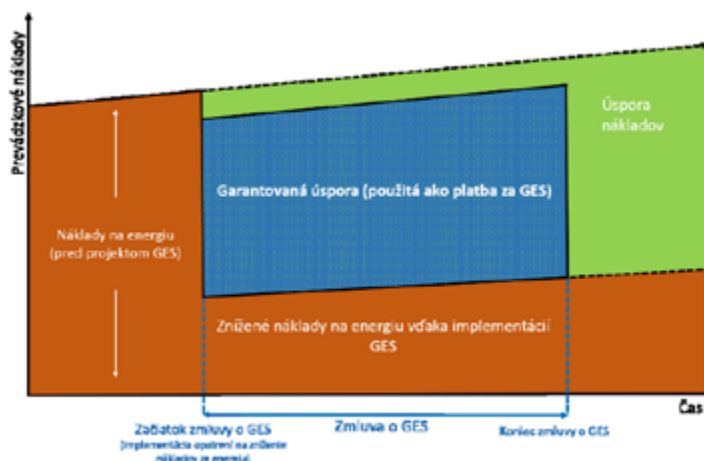
2.3 Vyhláška Ministerstva hospodárstva Slovenskej republiky č. 99/2015 Z.z.

Vyhláškou MH SR č. 99/2015 Z.z., sa ustanovujú podrobnosti pri poskytovaní podpornej energetickej služby a garantovanej energetickej služby. Upravuje podrobnosti o forme oznámenia a potvrdenia o splnení oznamovacej povinnosti o začiatku, zmene alebo ukončení poskytovania energetickej služby. Definuje obsah žiadosti o absolvovanie skúšky odbornej spôsobilosti na poskytovanie GES, zriadenie a činnosť skúšobnej komisie, rozsah, priebeh a spôsob vyhodnotenia skúšky a vzor osvedčenia o odbornej spôsobilosti na poskytovanie garantovanej energetickej služby [3].

3. Priebeh Garantovanej energetickej služby

Každý objekt vykazuje ročnú spotrebu a náklady na energiu, ktoré možno aplikovaním garantovanej energetickej služby znížiť.

Začiatkom je podpísané zmluvy o GES a vypracovanie energetickej analýzy, ktorá opisuje hlavné súčasný stav objektu, návrh opatrení pre zlepšenie energetickej efektívnosti a implementácia opatrení na zníženie nákladov za energiu v objekte. Poskytovateľ sa zaručí aby opatrenia na zlepšenie energetickej efektívnosti boli naozaj efektívne a aby dochádzalo k úsporám spotrieb a nákladov za energiu. Pri návrhu si poskytovateľ zvyčajne dáva určitú rezervu, ak by došlo k výpadku úspor. Práve pri takomto výpadku je poskytovateľ povinný uhradiť pokutu definovanú zmluvou. Takáto rezerva vo forme prebytku úspor je k dispozícii prijímateľovi. Návratnosť projektov GES je zvyčajne od 6 do 10 rokov, no pri stabilnom subjekte môže ísť aj o viac rokov (približne 15 rokov). Po skončení platnosti zmluvy o GES prijímateľ získava menšie úspory nákladov vďaka implementácii navrhovaných opatrení a celkovej modernizácii objektu [4].



Obrázok 1: Priebeh garantovanej energetickej služby[4].

4. GES v praxi

Pri garantovaných energetických službách sa uskutočňuje modernizácia objektov a zariadení prijímateľa služby, ktorá vedie k zníženiu nákladov na spotrebu energie a súvisiacich prevádzkových nákladov. Náklady na modernizáciu, ktorá je navrhnutá podľa požiadaviek prijímateľa, realizovaná a refinancovaná poskytovateľom, sa splácajú z úspor, dosiahnutých v budúcnosti, za ktoré poskytovateľ ručí. Po celú dobu splácania požadovanej modernizácie objektu, poskytovateľ poskytuje energetický manažment a vyhodnocuje dosahované úspory. V prípade, že by nastal problém v dosahovaní úspor, poskytovateľ sa zaväzuje uhradiť prijímateľovi služby finančnú hodnotu výpadku úspor. Garantovaná energetická služba sa využíva najmä pri obnove budov a systémov verejného osvetlenia.

4.1 Prípadová štúdia - bytový dom v Petržalke

Bytový dom sa nachádza v Bratislavskej mestskej časti Petržalka. Pozostáva z 13. nadzemných podlaží s priemernou konštrukčnou výškou jednotlivých podlaží 2,9 m. Zastavaná plocha objektu je 373 m² s obostavaným vykurovaným objemom 13 649 m³. V roku 2018 prešiel objekt čiastočnou rekonštrukciou, kedy boli vymenené pôvodné otvorové konštrukcie za nové s izolačným dvojsklom a plastovým rámom. Objekt je postavený ako montovaná stenová panelová sústava BA – NKS. Obvodový plášť je tvorený sendvičovou konštrukciou s hrúbkou 300 mm. Strešná konštrukcia je tvorená železobetónovými panelmi s hrúbkou 200 mm a je zateplená izoláciou s hrúbkou 50 mm.

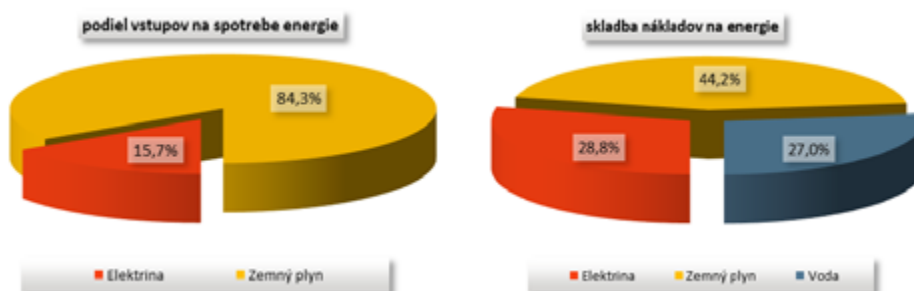
Zdrojom tepla pre objekt bytového domu v mestskej časti Petržalka je plynová kotolňa, nachádzajúca sa na prvom nadzemnom podlaží. Kotolňa je zaradená podľa STN 07 0703 ako kotolňa III. Kategórie s výkonom do 0,5 MW. V kotolni je osadených 7 plynových závesných kondenzačných kotlov s celkovým tepelným výkonom 395,5 kW a účinnosťou jedného kotla približne 86,0 %. Stály hydrostatický tlak vykurovacej sústavy zabezpečuje expanzná nádoba s objemom 750 litrov. Vykurovacia sústava je regulovaná pomocou ekvitermickej regulácie. Vo vykurovacom systéme je osadených 205 liatinových článkových vykurovacích telies s osadenými termostatickými hlaviciami. Príprava teplej vody je zabezpečená centrálnou pomocou dvoch zásobníkových ohrievačov s objemom 750 litrov. Osvetľovacia sústava a zdravotno-technické inštalácie prešli čiastočnou rekonštrukciou.



Obrázok 2: Bytový dom Petržalka

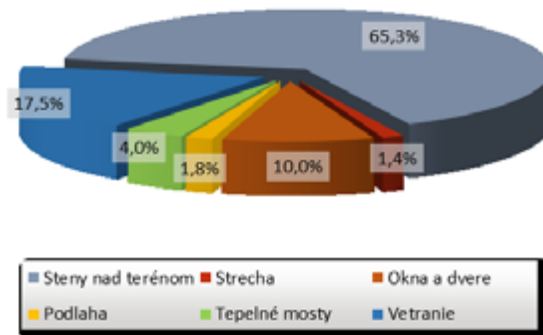
4.2 Údaje o priemerných ročných vstupov palív, energie a vody za rok 2016 – 2018

Priemerná ročná spotreba elektrickej energie v objekte bola v rokoch 2016 – 2018 na úrovni 174,1 MWh, vo finančnom vyjadrení 20 351 €/rok. Priemerná ročná spotreba zemného plynu bola na úrovni 86,9 tisíc m³/rok, vo finančnom vyjadrení 31 224 €/rok. Priemerná ročná spotreba vody bola v objekte na úrovni 10,3 tisíc m³/rok, vo finančnom vyjadrení 19 051 €/rok.



Obrázok 3: Percentuálny podiel vstupov palív, energie a vody za rok 2016 -2018

Potreba energie na krytie tepelných strát objektu je na úrovni 705 500 kWh s tepelnými ziskami 181 081 kWh a mierou využitia 95 %. Potreba tepla na vykurovanie objektu so započítaním tepelných ziskov je na úrovni 532 578 kWh.



Obrázok 4: Percentuálny podiel konštrukcií a tepelných mostov na celkovej mernej tepelnej strate

4.3 Návrh úsporných opatrení

Vzhľadom k využívaniu objektu a výške jednotlivých spotrieb boli navrhnuté nasledovné opatrenia na zníženie energetickej efektívnosti v objekte:

Tab. 1: Návrh úsporných opatrení pre objekt

| Názov opatrenia | Investícia (€) | Úspora (€) | Jednoduchá návratnosť v rokoch |
|---|----------------|------------|--------------------------------|
| Zateplenie obvodových stien | 220 000 | 18 177 | 12,1 |
| Zateplenie plochej strechy alebo podlahy na nevykurovanej povale alebo medzi krokvy | 12 500 | 244 | 51,2 |
| Výmena otvorových konštrukcií | 17 500 | 542 | 32,3 |
| Inštalácia solárnych kolektorov na prípravu TV | 18 900 | 637 | 29,7 |
| Inštalácia fotovoltických panelov na prípravu elektrickej energie | 8 000 | 440 | 18,2 |
| Rekonštrukcia zdroja tepla a vykurovacej sústavy | 20 000 | 474 | 42,2 |
| Rekonštrukcia zdravotno-technických zariadení | 3 164 | 5 714 | 0,6 |
| Modernizácia osvetľovacej sústavy | 15 600 | 2 350 | 6,6 |
| Zavedenie EMS ² | 3 920 | 5 465 | 0,7 |

² EMS – Systém energetickeho manažmentu, (z angl. Energy management system) – komplexný systém merania, zaznamenávania, porovnávania a vyhodnocovania spotreby energií na úrovni celého subjektu, za účelom návrhu, realizácie a vyhodnocovania úsporných opatrení. Odhadované náklady a benefity spojené s návrhom a realizáciou EMS vychádzajú z odhadovaných úspor a odhadovaného počtu inštalovaných meradiel a snímačov do budovy. V ekonomickom hodnotení je potrebné okrem investičných nákladov a generovaných úspor uvažovať aj s prevádzkovými nákladmi..

4.4 Návrh úsporných opatrení pre GES

Nakoľko by všetky navrhované opatrenia nevyhovovali pre realizáciu pomocou GES, boli vybrané tie opatrenia, ktoré majú najväčší vplyv pre zníženie spotrieb a nákladov na energiu a zlepšenie celkovej energetickej efektívnosti v objekte. GES náklady sú percentuálne navýšené vzhľadom k potrebným úkonom pre začatie implementácie GES.

Tab. 2: Návrh úsporných opatrení pre GES

| Názov opatrenia | Investícia (€) | Náklady pre GES projekt (€) | GES Úspora (€) | GES Náklady (€) | GES návratnosť (roky) |
|---|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------|-----------------------|
| Zateplenie obvodových stien | 220 000 | 264 000 | 18 177 | 9 900 | 26,6 |
| Zateplenie plochej strechy alebo podlahy na nevykurovanej povale alebo medzi krokvy | 12 500 | 15 000 | 244 | 563 | -39,2 |
| Inštalácia fotovoltických panelov na prípravu elektrickej energie | 8 000 | 9 600 | 440 | 560 | -66,7 |
| Rekonštrukcia zdroja tepla a vykurovacej sústavy | 20 000 | 2 400 | 474 | 1 400 | -21,6 |
| Rekonštrukcia zdravotno-technických zariadení | 3 164 | 3 797 | 5 714 | 222 | 0,6 |
| Modernizácia osvetľovacej sústavy | 15 600 | 18 720 | 2 350 | 1 922 | 12,4 |
| Zavedenie EMS | 3 920 | 4 704 | 5 465 | 275 | 0,8 |

4.5 Projekt GES v trvaní do 15 rokov

Využitie garantovanej energetickej služby bolo posudzované s aktuálnymi podmienkami finančného trhu, ktoré umožňujú financovanie projektov v trvaní do 15 rokov.

Tab. 3: Financovanie projektu GES v trvaní do 15 rokov

| Investícia (€) | Úspora (€) | Jednoduchá návratnosť (roky) | GES investícia (€) | GES investícia s financovaním (€) | GES úspory (€) | GES náklady (€) | GES návratnosť (roky) |
|----------------|------------|------------------------------|--------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|-----------------------|
| 319 584 | 34 043 | 9,4 | 283 184 | 339 821 | 32 864 | 14 012 | 15,0 |

5. Záver

Cieľom tohto príspevku bolo priblížiť možnosti úspory energie pomocou energetickej služby. Stále viac užívateľov vyhľadáva práve tento spôsob riešenia ich problémov či už v podpornej forme, alebo vo forme garantovaných úspor. Návratnosť GES býva zvyčajne 6-10 rokov, pričom úspory sú garantované poskytovateľom GES. Jednou z hlavných výhod GES je skutočnosť, že energeticky efektívne opatrenia sú realizované hneď a celé riziko spojené s návratnosťou opatrení a ich ziskovosťou na seba preberá ESCO spoločnosť.

Literatúra

- [1] Zákon č. 321/2014 Z. z. o energetickej efektívnosti a o zmene a doplnení niektorých zákonov.
- [2] Smernica Európskeho parlamentu a rady 2012/27/EÚ o energetickej efektívnosti.
- [3] Vyhláška MH SR č. 99/2015 Z.z., ktorou sa ustanovujú podrobnosti pri poskytovaní podpornej energetickej služby a garantovanej energetickej služby.
- [4] Asociácia poskytovateľov energetickej služby
Dostupné na internete:
<<http://www.apes-sk.eu/co-je-epc/legislativa/>>

Dominika Juhošová¹

Študijný program: Teória a technika prostredia budov, ročník: 2

HYGIENA PITNEJ VODY Z HĽADISKA PRIPÁJACÍCH POTRUBÍ VODOVODU

HYGIENE OF POTABLE WATER FROM THE POINT OF VIEW OF INSTALLATION OF BRANCH PIPES

Abstract

Water supply with potable and hygienically suitable water is important for both residential and commercial buildings like hospitals, schools, office buildings, hotels, sports facilities, retirement homes, restaurants and the others. The contribution focuses on hygiene of potable from the point of view of routing of cold and hot water pipes and its arrangement. To ensure the hygiene of potable water, it is necessary to propose the proper system solution of the water supply because in buildings usually are not ideal conditions for potable water. The resulting hygienic risks can be reduced using the right technical solution. In the paper the classical trunk-and-branch system with the hygienically more suitable installations using a special flow-through valves are compared.

Kľúčové slová

pitná voda, studená voda, teplá voda, pripájacie potrubie, hygiena pitnej vody

Úvod

Zásobovanie objektov pitnou a hygienicky nezávadnou vodou je dôležité tak pre obytné budovy ako aj pre budovy komerčné, t.j. nemocnice, administratívne budovy, hotely, športové zariadenia, priemyselné závody, domovy dôchodcov, reštaurácie a iné. Základné faktory ovplyvňujúce kvalitu pitnej vody v budovách sú: materiál potrubia, správne dimenzovanie potrubia, prevádzka vodovodu bez stagnácie, systémové riešenia vnútorných rozvodov, správna prevádzka a údržba systému. V budovách sa väčšinou ideálne podmienky pre zabezpečenie hygieny pitnej vody nevyskytujú, výsledné hygienické riziká sa však dajú znížiť správnym technickým riešením.

Pitná voda sa definuje ako voda, ktorá je určená na ľudskú spotrebu [1]:

a) voda v jej pôvodnom stave alebo po spracovaní, určená na pitie, varenie, prípravu potravín alebo iné domáce účely, bez ohľadu na jej pôvod a na to, či bola dodaná z distribučnej siete, cisterny alebo vo fľašiach či nádobách;

b) voda používaná v potravinárskych podnikoch pri výrobe, spracovaní, konzervovaní alebo predaji výrobkov alebo látok určených na ľudskú spotrebu [1].

Pitná voda musí spĺňať požiadavky podľa platnej legislatívy. Na všetky členské štáty Európskej únie sa vzťahuje smernica Rady 98/83/ES [1] z 3. novembra 1998 o kvalite vody určenej na ľudskú spotrebu. Smernica je na Slovensku implementovaná v nariadení vlády SR č. 247/2017 Z. z. [2], ktorým sa ustanovujú podrobnosti o kvalite pitnej vody, kontrole kvality pitnej vody, programe monitorovania a manažmente rizík pri zásobovaní pitnou vodou. Za kvalitu pitnej vody aj jej kontrolu zodpovedajú dodávatelia pitnej vody - prevádzkovatelia verejných vodovodov. V objekte zodpovedá za kvalitu a kontrolu pitnej vody prevádzkovateľ budovy.

¹ Dominika Juhošová, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra Technických zariadení budov, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

1. Základné faktory ovplyvňujúce kvalitu pitnej vody

Medzi najdôležitejšie faktory ovplyvňujúce kvalitu pitnej vody v budovách patria:

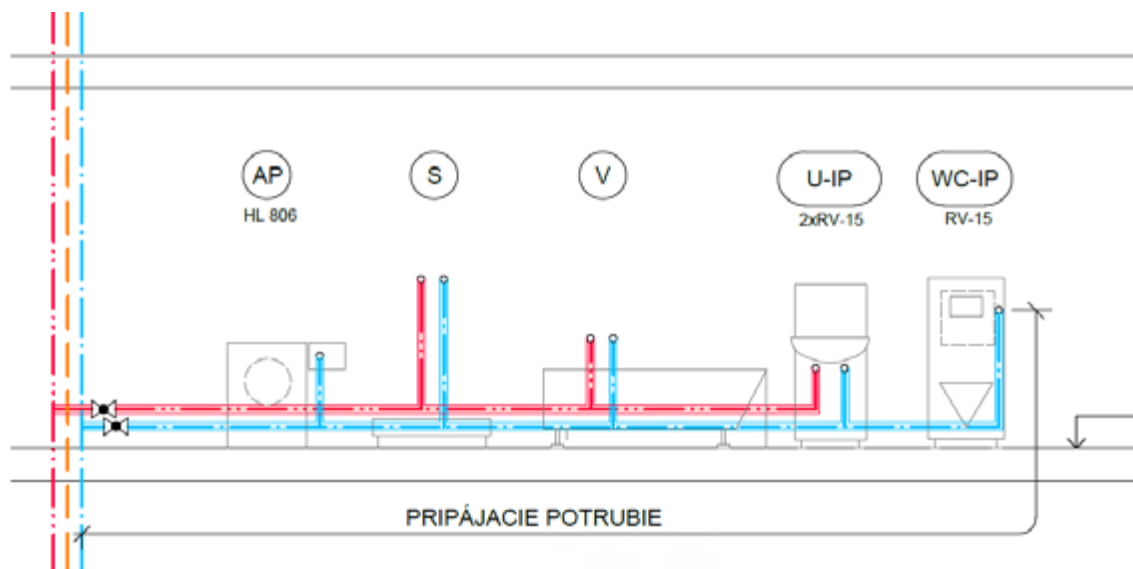
- **materiál potrubia:** použitie nevhodných materiálov a ich nevhodná kombinácia vedie k zvýšenej koncentrácii látok rozpustených z inštalovaných materiálov,
- **stagnácia vody:** výskyt príliš nízkej rýchlosti prúdenia vody v potrubíach (predimenzovaný priemer potrubia) či prerušenie dodávky vody na istú dobu spôsobujú zmenu kvality vody v dôsledku väčšej stagnácie, ktorá vedie k zvýšeniu koncentracii rozpustených látok,
- **systémové riešenia vnútorných rozvodov [3].**

Z hľadiska hygieny pitnej vody by bola ideálna nepretržitá prevádzka budovy a pravidelný odber vody zo všetkých výtokových armatúr. Za týchto podmienok voda vždy zostáva v pohybe, nehrozí nebezpečenstvo stagnácie. Tieto podmienky sa väčšinou v budovách nevyskytujú. Hygienickým rizikám sa dá zabrániť napr. ručným alebo automatickým preplachovaním potrubia. Existujú aj spôsoby pripojenia pripájacieho potrubia vodovodu na výtokové armatúry tak, že celý úsek pripájacieho potrubia je preplachovaný vodou pri každom použití výtokovej armatúry.

2. Varianty napojenia pripájacích potrubí

Pripájacie potrubie vodovodu je úsek potrubia od napojenia na stúpacie potrubie k výtokovým armatúram (obr.1). Pripájacie potrubia môžu byť vedené:

- v predstevom systéme,
- v drážkach a otvoroch v stene (vzniká riziko šírenia hluku),
- zabudované v podlahových vrstvách, vedené v ochranných rúrkach a v tepelnej izolácii,
- vedené voľne, napr. za kuchynskou linkou.



Obr. 1: Pripájacie potrubie vodovodu studenej a teplej vody [autor]

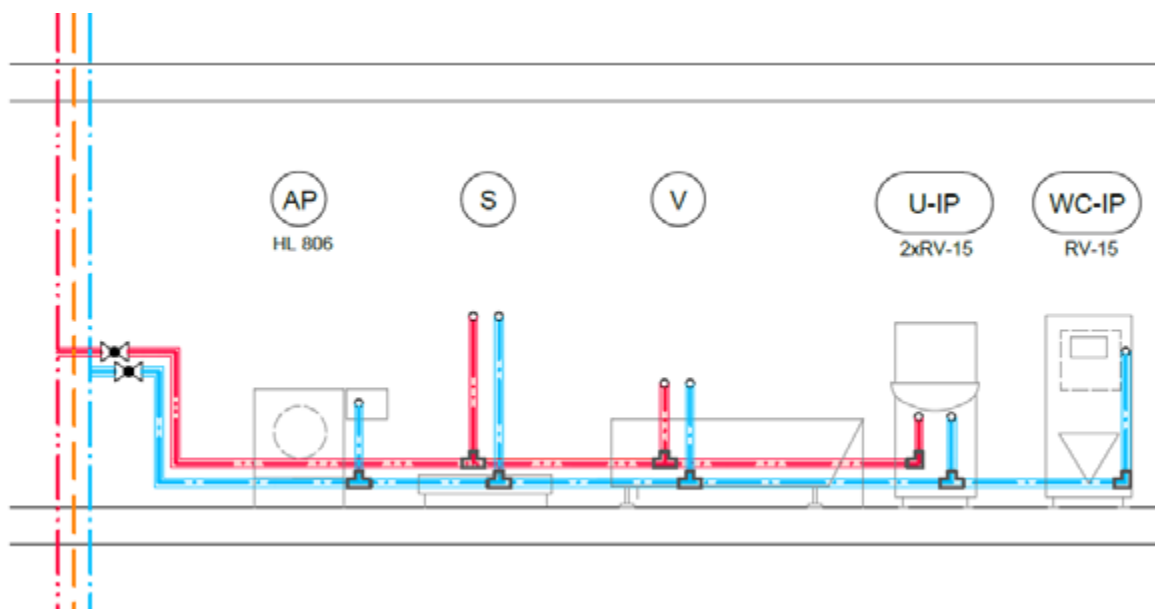
AP: automatická práčka, S: sprcha, V: vaňa, U-IP: umývadlo s inštalačným prvkom,
WC-IP: WC s inštalačným prvkom, RV: rohový ventil

- — — — — studená voda,
- — — — — teplotá voda,
- — — — — cirkulácia teplej vody

V dôsledku stagnácie môže pitná voda dosahovať kritické teplotné rozsahy - teplota studenej vody môže stúpnuť nad 15°C a teplota teplej vody môže klesnúť pod 45 °C, čím vznikajú ideálne podmienky pre rast mikroorganizmov. Medzi ohrozené patria zriedkavo používané výtokové armatúry, ako napr. toaleta pre hostí, pripojenie vody na záhradnú hadicu či požiarny vodovod. Ak sú v kúpeľni k dispozícii zároveň vaňa aj sprchovací kút, spravidla nie je zaručené pravidelné používanie oboch zmiešavacích batérií. Vhodne navrhnuté potrubie môže znížiť riziko stagnácie, najmä v zriedkavo používaných výtokových armatúrach, a tým významne prispieť k udržaniu kvality pitnej vody [4].

2.1 Vetvové pripájacie potrubie s napojením armatúr pomocou tvaroviek z T-kusov

Vetvové pripájacie potrubie pozostáva z pripájacieho potrubia na studenú resp. teplú vodu. Výtokové armatúry sú na pripájacie potrubie napojené pomocou T-kusov (obr. 2). Tento typ pripojenia sa v našich podmienkach navrhuje najčastejšie. Za predpokladu, že sa všetky výtokové armatúry používajú pravidelne, vytvárajú sa vhodné podmienky pre hygienickú prevádzku potrubia pitnej vody. Nebezpečné sú len zriedka používané úseky potrubia, ktoré môžu vytvoriť vhodné podmienky pre baktérie, ktoré kontaminujú zvyšok potrubnej siete [4].



Obr. 2: Vetvové pripájacie potrubie s napojením armatúr pomocou tvaroviek z T-kusov [autor]

Výhody:

- menšia spotreba materiálu
- riešenie je najlacnejšie
- pripájacie potrubia možno pohodlne viesť aj v drážke
- priaznivá hydraulika
- pri pravidelnom používaní zariadení je správna hygiena pitnej vody

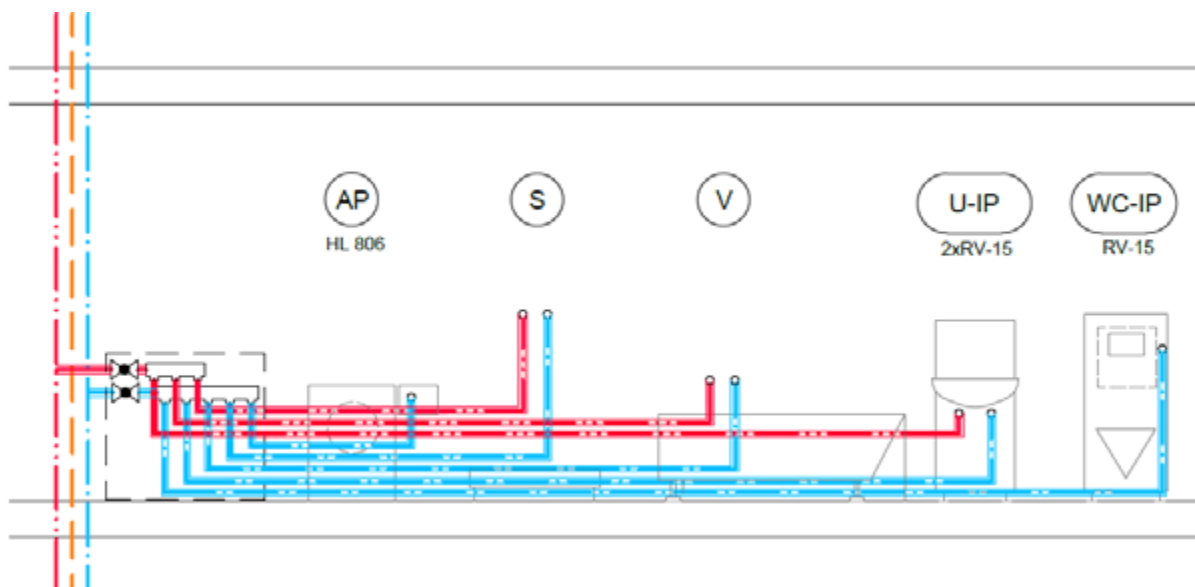
Nevýhody:

- inštalácia zahŕňa veľa fittingov čo predstavuje dlhší čas potrebný na jej zhotovenie
- nebezpečenstvo stagnácie v nepravidelne používaných úsekoch potrubia

Poznámky: Na konci pripájacieho potrubia by mal byť umiestnený pravidelne používaný zariadenie – v prípade studenej vody napr. WC, v prípade teplej vody napr. umývadlo.

2.2 Pripájacie potrubie napojené cez rozdeľovač so samostatnými potrubiami pre jednotlivé výtokové armatúry

Tento variant pozostáva zo samostatných pripájacích potrubí studenej a teplej vody pre každú výtokovú armatúru (obr. 3). Pri tomto type pripojenia je potrebná inštalácia rozdeľovača na studenú a teplú vodu. Každá výtoková armatúra je k rozvážaču pripojená samostatným pripájacím potrubím. V porovnaní s vetvovou inštaláciou je pri tomto type pripojenia zabezpečený vyšší štandard hygieny pitnej vody s ohľadom na kratší čas preplachovania potrubia [4].



Obr. 3: Pripájacie potrubie napojené cez rozdeľovač so samostatnými potrubiami pre jednotlivé armatúry [autor]

Výhody:

- vyváženejšia hydraulika
- nižšie tlakové straty
- menšie dimenzie potrubia
- nízky objem vody v potrubí

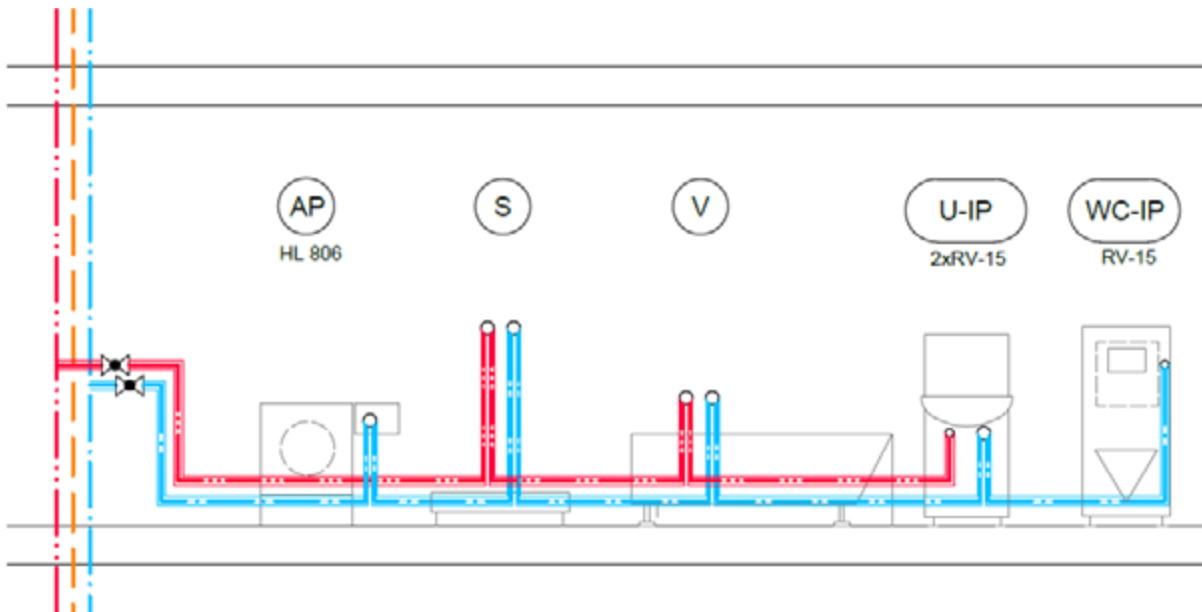
Nevýhody:

- väčšia spotreba materiálu
- vyššia cena
- nebezpečenstvo stagnácie v nepravidelne používaných úsekoch potrubia

Poznámky: Usporiadanie zariadení predmetov neovplyvňuje hygienu pitnej vody, preto môžu byť zariadenia predmetov usporiadané ľubovoľne.

2.3 Pripájacie potrubie so sériovým napojením výtokových armatúr

Tento spôsob napojenia pozostáva zo sériovej inštalácie pripájacieho potrubia (obr. 4) s napojením výtokových armatúr cez špeciálne prietokové nástenné kolená (obr. 5). Pri odbere vody z výtokovej armatúry prechádza voda postupne cez prietokové nástenné kolená, čo vďaka lepšiemu preplachovaniu potrubia významne znižuje riziko stagnácie vody. Tento typ pripojenia zatiaľ nie je rozšírený, ale stáva sa čoraz dôležitejším. Úplná výmena vody je zabezpečená otvorením poslednej výtokovej armatúry, preto by sa mal ako posledný zariadený predmet inštalovať ten, ktorý sa používa najčastejšie. Sériový spôsob inštalácie predstavuje hygienické vylepšenie oproti zavedeným variantom [4].



Obr. 4: Pripájacie potrubie so sériovým napojením výtokových armatúr [autor]

Výhody:

- menšia spotrebu materiálu
- lepšie preplachovanie
- významne znížené riziko stagnácie vody

Nevýhody:

- zvýšené tlakové straty
- väčšie dimenzie potrubia
- vyššia cena kvôli použitiu špeciálnych prietokových nástienok

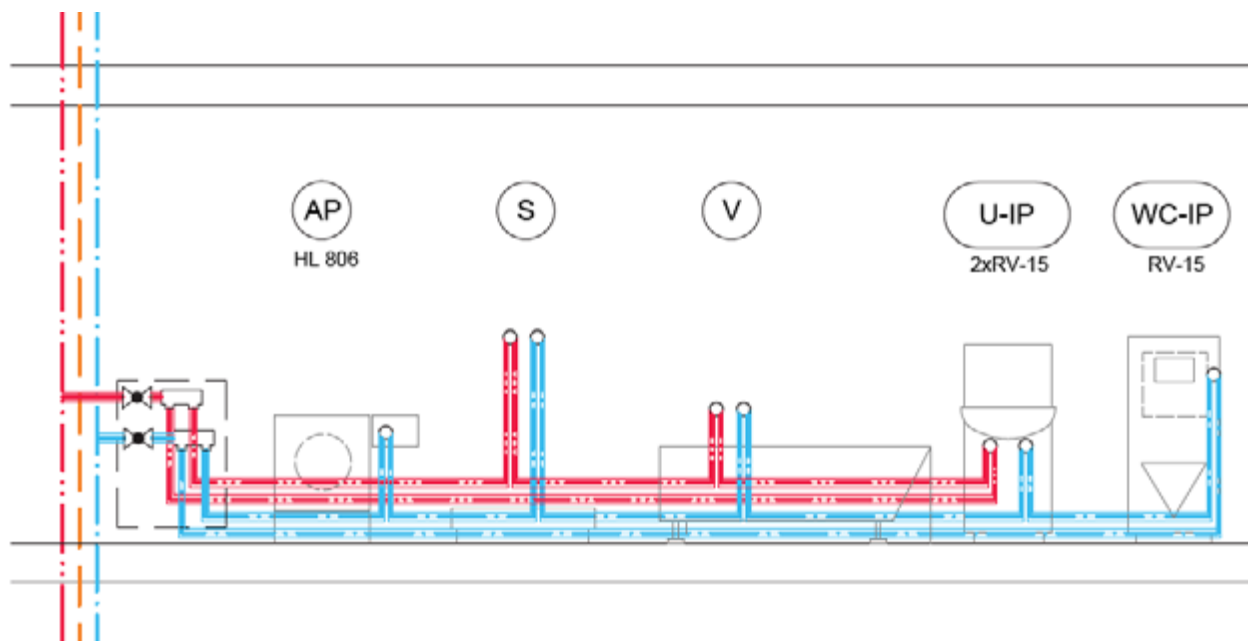
Poznámky: Na konci pripájacieho potrubia by mal byť umiestnený pravidelne používaný zariadený predmet – v prípade studenej vody napr. WC, v prípade teplej vody napr. umývadlo.



Obr. 5 Prietoková nástienka – variant z červeného bronzu a ušľachtilej ocele [5].

2.4 Pripájacie potrubie so sériovým okruhovým napojením výtokových armatúr

Pri tomto type pripojenia je každá výtoková armatúra napojená na prívod vody z dvoch strán cez prietokové ventily, pripájacie potrubie je zokruhované (obr. 6). Ku každej výtokovej armatúre prúdi voda z oboch strán, tlakové straty sa preto minimalizujú a pri každom odbere vody sa uvedie do pohybu celý objem vody v potrubí. Otvorením ktorejkoľvek zmiešavacej batérie sa voda po celej trase vymení, čím sa riziko stagnácie a jej negatívny vplyv na kvalitu pitnej vody zníži na minimum. V prípade prerušenia prevádzky sa vyžaduje prepláchnutie ktorejkoľvek výtokovej armatúry [4].



Obr. 6 Pripájacie potrubie so sériovým okruhovým napojením výtokových armatúr [autor]

Výhody:

- menšie tlakové straty
- priaznivá hydraulika
- menšie dimenzie potrubia
- lepšie preplachovanie potrubia
- riziko stagnácie znížené na minimum

Nevýhody:

- vyššia spotreba materiálu
- vyššia cena inštalácie kvôli použitiu špeciálnych prietokových nástieniek

Poznámky: Voda prúdi ku každej výtokovej armatúre z dvoch strán, potrubie je pri každom otvorení armatúry prepláchnuté a preto je usporiadanie zariadení ľubovoľné.

2.5 Pripájacie potrubie so sériovým okruhovým napojením výtokových armatúr s cirkuláciou teplej vody

Posledným variantom je okruhé napojenie výtokových armatúr s cirkuláciou teplej vody, kde od sériového pripojenia je rozdiel v tom, že teplá voda je napojená na cirkuláciu (obr. 7). Tento typ inštalácie predstavuje veľmi vysoký štandard riešenia hygieny pitnej vody [4].

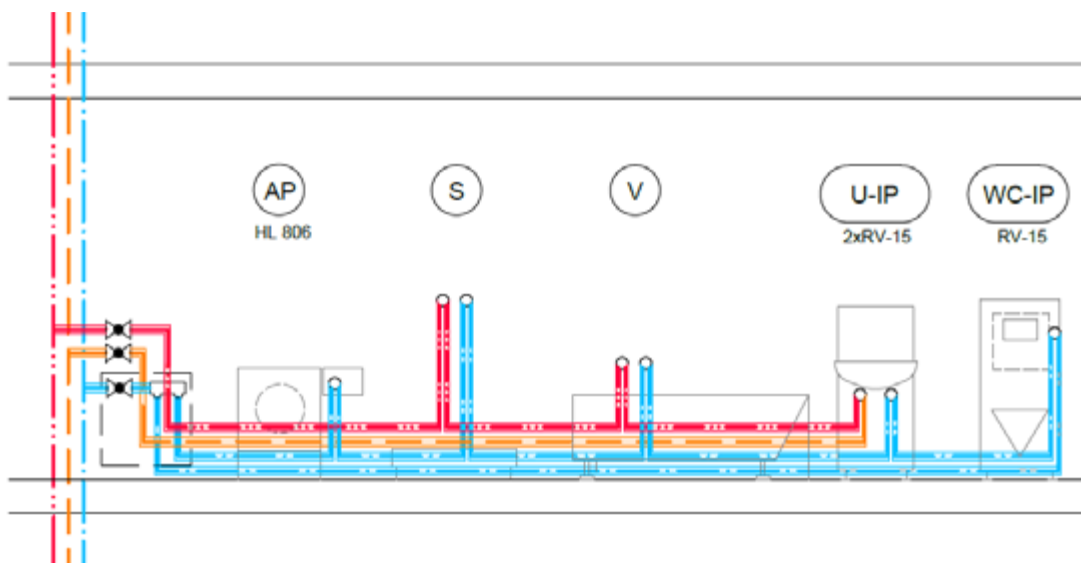
Výhody:

- priaznivá hydraulika
- zníženie rizika šírenia baktérie Legionella
- lepšie preplachovanie potrubia
- riziko stagnácie znížené na minimum
- veľmi vysoký štandard riešenia hygieny pitnej vody

Nevýhody:

- vyššia spotreba materiálu
- nutnosť riešenia regulačných armatúr na cirkulačnom potrubí
- komplikácie pri meraní spotreby teplej vody a jej fakturácii pre konečného spotrebiteľa v bytových domoch
- vyššia cena inštalácie kvôli použitiu prietokových a regulačných ventilov

Poznámky: Usporiadanie zariadení môže byť ľubovoľné.

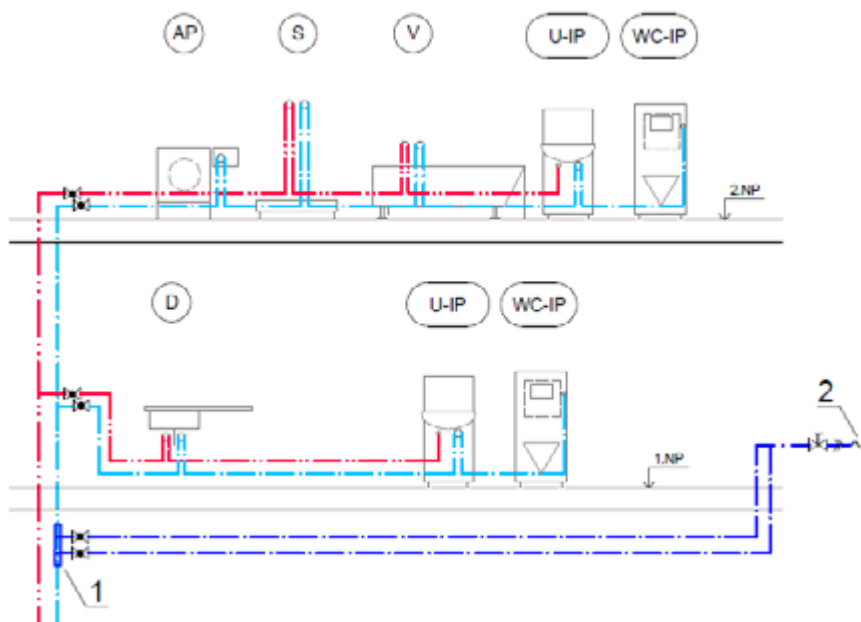


Obr. 7 Sériové okruhové napojenie výtokových armatúr s cirkuláciou teplej vody [autor]

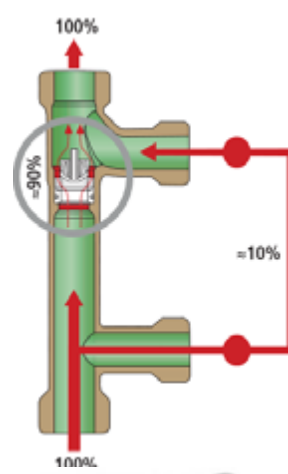
3. Venturiho rozdeľovač prúdenia na zabezpečenie hygienickej prevádzky vodovodu

Pre výtokové armatúry zariadených predmetov, ktoré sú menej využívané a tam, kde hrozí stagnácia vody (napr. pripojenie vody na záhradnú hadicu (obr. 8a), kúpeľňa pre hostí a pod.) sa odporúča okruhové pripojenie v kombinácii s Venturiho rozdeľovačom prúdenia (obr. 8c).

a)



b)



c)



Obr. 8 Venturiho trubica s dynamickým rozdeľovačom prúdenia

a) schéma zapojenia [autor], b) princíp činnosti [6], c) pohľad na rozdeľovač prúdenia [6]
1 - Venturiho rozdeľovač prúdenia, 2 - mrazuvzdorná vonkajšia armatúra na pripojenie hadice

Tieto rozdeľovače umožňujú rozdelenie prietoku do hlavného (stúpacieho) a do pripájacieho potrubia bez regulačných armatúr. Činnosť sa zakladá na princípe techniky Venturiho trubice. Vďaka zúženiu vnútorného priemeru potrubia sa vytvára rozdiel tlaku, ktorý vynucuje nútené prúdenie vody

do pripájacieho potrubia (cca 5–10 % z celkového objemu prúdiacej vody). Tento podiel vody prejde okruhom pripájacieho potrubia a prepláchnu ho bez nutnosti otvorenia výtokovej armatúry (obr. 8b). Zvyšných cca 90 % objemu vody preteká ďalej stúpacím potrubím, za rozdeľovačom prúdenia sa na tento tok opäť pripojí aj zvyšných 10 % objemu prúdiacej vody [6].

4. Záver

Pripájacie potrubia vodovodu majú veľký význam pri zabezpečovaní hygieny pitnej vody. V príspevku je popísaných päť spôsobov riešenia pripájacieho potrubia. Pre rodinné a bytové domy sa odporúča sériová (kap. 2.3) alebo okruhovú inštaláciu (kap. 2.4). Pre kancelárske budovy sa odporúča inštalovať pripájacie potrubie so sériovým okruhovým napojením armatúr na cirkuláciu teplej vody (kap. 2.5). Pre menej využívané zariadenie predmety sa odporúča využívať Venturiho dynamický rozdeľovač prúdenia (kap. 3). Pripojenia výtokových armatúr pomocou odbočiek z T-kusov (kap. 2.1) je najlacnejším variantom a preto sa využíva najčastejšie, toto pripojenie je však z hľadiska hygieny pitnej vody najhorším riešením. **Otázkou do budúcnosti je, či sa budú chcieť investori preorientovať z riešenia lacnejších alternatív a použitím lacnejších materiálov potrubia na zabezpečenie hygienicky bezpečnejšej prevádzky vodovodu v budove.**

Podakovanie

Príspevok bol podporovaný Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR prostredníctvom grantov VEGA 1/0807/17 a VEGA 1/0847/18.

Literatúra

- [1] Smernica Rady 98/83/ES z 3.novembra 1998 o kvalite vody určenej na ľudskú spotrebu v znení nariadenia Európskeho parlamentu a Rady (ES). 2015
- [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. 2017
- [3] PERÁČKOVÁ, J.: Pitná voda - potravina č.1. Ako si udržať jej kvalitu v budove? *TZB Haustechnik*. 2019, roč. 27, č. 3, s. 50-53, ISSN 1210-356X
- [4] FORUM WASSERHYGIENE: FWH-Richtlinie 01, Planung, Errichtung, Inbetriebnahme und Betrieb von Trinkwasserinstallationen in Gebäuden, Praxistaugliche Hinweise mit besonderem Fokus auf die hygienischen Aspekte, Entwurf Stand Juni 2018
- [5] REHAU – Technická informácia: Systém domovej inštalácie Rautitan, Kompletný systém pre pitnú vodu a vykurovanie [online]
- [6] Kemper – Hygienický systém KEMPER KHS, Venturiho delič proudění HHS [online]
- [7] UPONOR – Hygienické zásobovanie pitnou vodou [online]
- [8] GEBERIT – Hygiena pitnej vody Geberit [online]
- [9] C. SCHAUER, K. DINNE, J. MAMPAEY, W. V.D. SCHEE, I. GATTO, J. PERÁČKOVÁ, D. PETRÁŠ and B. BLEYS: *Hygiene in potable water supply installations – Requirements for design, execution, operation and maintenance*. REHVA Guidebook, 2019
- [10] S. LA MURA, C. MARLA JAPPOLO, L. A. PITERÁ, J. P. ANGERMANN and M. IZARD: *Legionellosis Prevention in Building Water and HVAC Systems – A Practical Guide for Design, Operation and Maintenance to Minimize the Risk*, REHVA Guidebook. 2013. 122 s.
- [11] W.G. VAN DER SCHEE: Regulation on Legionella prevention in collective water systems. In: *CIB W062 WATER SUPPLY AND DRAINAGE FOR BUILDINGS - ANNUAL MEETING 2005 (Proceedings of the 31st International Symposium)*. Rotterdam. 16 s. [online]
- [12] PETERGÁČOVÁ I., BRATSKÁ Z.: Novelizované právne predpisy pre kvalitu pitnej vody. In: *Peráčková, J. Sanhyga 2018*. Bratislava: SSTP, 2018. s. 19-22. ISBN 978-80-89878-30-7

Matej Kubica¹

Študijný program: teória a technika prostredia budov, ročník: 3.

PRÍPRAVA MERANÍ NA KONŠTRUKČNÝCH MODELOCH KOMPAKTNEJ STANICE TEPLA S POUŽITÍM OBNOVITEĽNÝCH ZDROJOV ENERGIE

PREPARATION OF MEASUREMENTS ON DESIGN MODELS OF COMPACT HEAT STATION USING RENEWABLE ENERGY SOURCES

Abstract

The paper describes the mobile laboratory and its equipment for measurement of design models. The design models of the new compact station are based on the latest theoretical foundations of building technical equipment and their common control.

Kľúčové slová

príprava meraní, kompaktná stanica, obnoviteľné zdroje energie, laboratórium

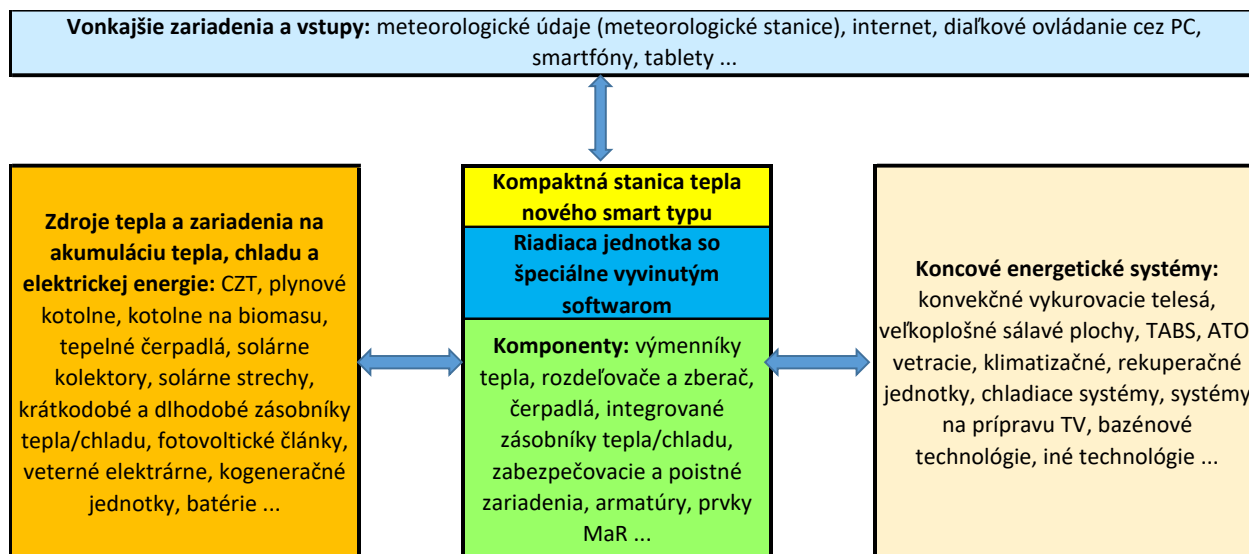
1. Úvod

Práca opisovaná v príspevku sa venuje výskumu, meraniu a optimalizácii kompaktnej stanice tepla nového S.M.A.R.T. typu. Self-Monitoring, Analysing and Reporting Technology alebo S.M.A.R.T. je monitorovací systém technologických zariadení, ktorý deteguje a posiela správy o rôznych ukazovateľoch spoľahlivosti v snahe predvídať zlyhania. Kompaktná stanica tepla nového smart typu predstavuje technologické zariadenie s riadiacou jednotkou, ktorá dokáže monitorovať, analyzovať, detegovať a predvídať zlyhania, zabezpečuje komunikáciu a spoluprácu technologických komponentov kompaktnej stanice tepla vzájomne medzi sebou ale aj s externými zariadeniami pomocou softvéru špeciálne vyvinutého na tieto účely a umožňuje ovládanie na diaľku.

Technický vývoj technológií v každom vednom odbore a technickej oblasti smeruje k totálnemu zosieťovaniu. Dôvodom je využitie obrovského množstva informácií na podstatne rýchlejšie a správnejšie rozhodovanie. Tesné prepojenie technologických komponentov kompaktnej stanice tepla nového smart typu, zdrojov tepla, koncových prvkov energetických systémov, ľudí ako užívateľov má dosiahnuť zníženie energetickej náročnosti budov, zvýšiť ekonomickú efektívnosť technických zariadení budov, znížiť prevádzkové náklady a šetriť životné prostredie dlhodobou udržateľným spôsobom.

Vyvíjaná kompaktná stanica tepla obsahuje okrem pripájacích a odovzdávacích uzlov aj pripojenia na zdroje tepla a akumuláciu energie.

¹ Matej Kubica, Ing. Radlinského 11, 811 07 Bratislava



Obrázok 1: Principiálna schéma kompaktnej stanice tepla nového smart typu[6].

2. Progressívne technológie v konštrukčných modeloch

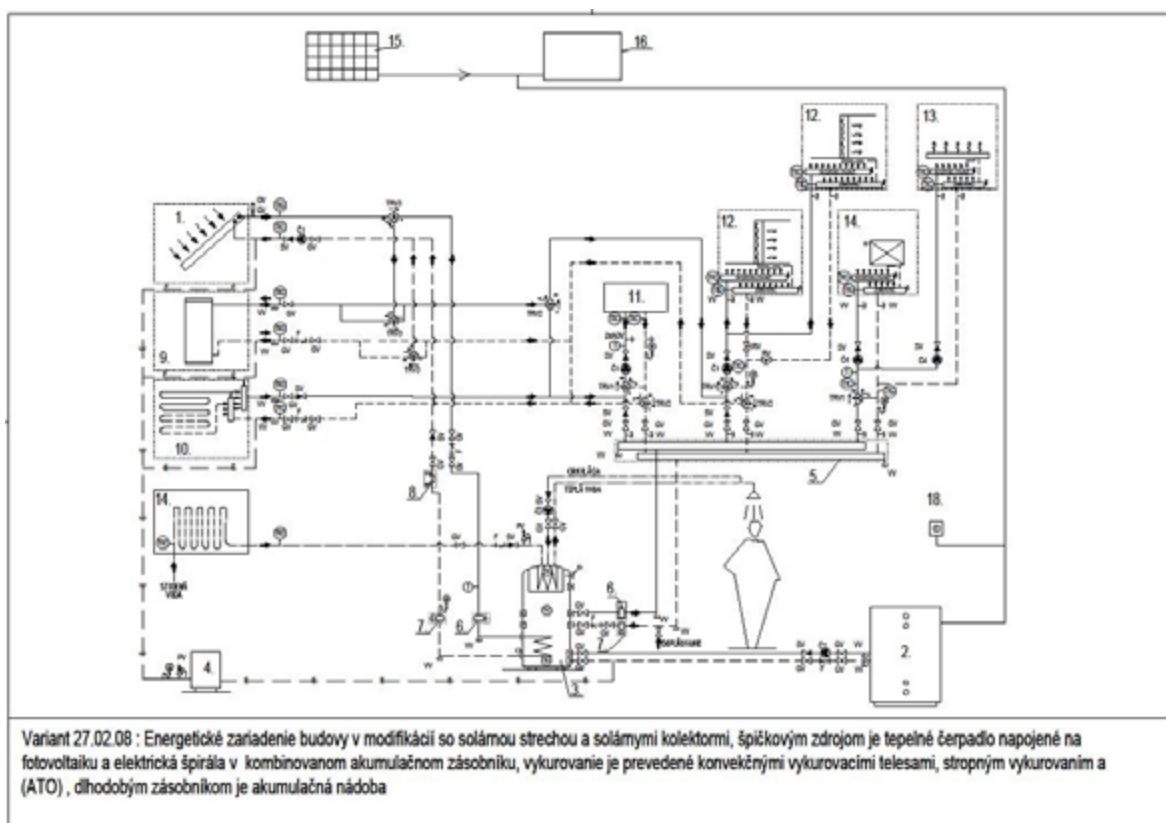
Progressívne technológie a materiály pre aplikáciu obnoviteľných zdrojov energie v budovách pozostávajú z týchto základných komponentov[1], [2], [3]:

- Solárnych kolektorov (môžu byť v kombinácii so solárnymi strechami)
- Dlhodobých zásobníkov tepla na báze kvapaliny (odovzdávanie tepla pomocou špirály do kvapaliny), tuhej látky (odovzdávanie tepla napr. do zemin pomocou rúrového registra) alebo zmeny skupenstva (odovzdávanie pomocou špirály napr. do parafínu),
- Krátkodobých zásobníkov tepla na báze kvapaliny alebo zmeny skupenstva
- Chladiaceho systému, ktorého základ je v rúrovom registri umiestnenom v nezámrznej hĺbke zemin (môže byť doplnený o externý chladič a akumuláciu chladivovej látky)
- Rekuperačného vykurovaco/vetracieho systému, ktorého základ je rekuperačná VZT jednotka s predohrevom alebo chladením vzduchu v jednorúrovňových alebo dvojúrovňových protiprúdových výmenníkoch tepla umiestnených v nezámrznej hĺbke zemin. Konečná tepelná úprava vetracieho vzduchu je pomocou kvapalných, plynných alebo elektrických výmenníkov tepla (ohrievače, chladiče) integrovaných vo VZT jednotkách alebo externých umiestnených v distribučnom systéme VZT. Tento systém môže byť doplnený nízkoteplotnými vykurovacími a vysokoteplotnými chladiacimi systémami slúžiacimi na temperovanie vnútorného prostredia budovy
- Zo stavebných konštrukcií (strecha a vonkajšie steny) s vnútorným zdrojom energie – aktívnou tepelnou ochranou tvorenou rúrovým systémom opatreným rozvážacou vrstvou (omietka, tepelne vodivá fólia, tepelne vodivý náter alebo nástrek) umiestneným medzi nosnou časťou stavebných konštrukcií a tepelnoizolačnou vrstvou
- Špičkového (pohotovostného) zdroja tepla (elektrická špirála v krátkodobej akumulácii nádob, elektrický kotol, plynový kotol, tepelné čerpadlo, krb, iný zdroj tepla a kombinácie viacerých zdrojov tepla)
- Softvéru regulátora MaR (merania a regulácie), ktorý riadi všetky akčné členy a komponenty kombinovaného stavebno-energetického systému budovy

2. Matematicko-fyzikálne modely energetických systémov kompaktnej stanice tepla

V súlade so smernicou 2010/31/EÚ o budovách s takmer nulovou potrebou energie, požiadavkou na dosiahnutie energetickej triedy A0 primárnej energie budovy, požiadavkou na kvalitné obalové stavebné konštrukcie budov s cieľovými tepelnými odporami v zmysle STN EN 73 0540, taktiež požiadavkou na zvýšenie využívania OZE boli vypracované technické riešenia, ktoré sú prezentované:

- a) **úžitkovým vzorom č.5749: SPÔSOB PREVÁDZKY KOMBINOVANÉHO STAVEBNO-ENERGETICKÉHO SYSTÉMU BUDOV A ZARIADENIE** zapísanom v Banskej Bystrici v apríli 2011 (autor doc. Ing. Daniel Kalús, PhD.)[4].
- b) **európskym patentom EP 2 572 057 B1: TEPELNO-IZOLAČNÝ PANEL PRE SYSTÉMY S AKTÍVNYM RIADENÍM PRECHODU TEPLA** v októbri 2014 (autor doc. Ing. Daniel Kalús, PhD.) [5].



Obrázok 2: Matematicko-fyzikálny model – variant 27.02.08 [Autor: Matej Kubica]

Pri tvorbe matematicko-fyzikálnych modelov sa zameriame na varianty zapojení so zariadeniami ponúkaných na slovenskom a rakúskom trhu. Z variant zapojení pre samotný výskum a vývoj vyberieme tie, ktoré sú v súčasnosti najpoužívanejšie pri individuálnej bytovej zástavbe. Jeden z možných variantov je zobrazený na obrázku 2, kde matematicko-fyzikálny model obsahuje alternatívny zdroj energie (solárny ohrev vody, FV články a iné), špičkový zdroj (tepelné čerpadlo, kotol na elektrickú energiu, kotol na biomasu), dva krátkodobé zásobníky, zásobník na teplú vodu s vlastným ohrevom, jednotku na spätné získavanie tepla, chladiaci okruh.

4. Nastavovacie merania na mobilnom laboratóriu

Nastavovacie merania v laboratóriu a merania konštrukčných modelov kompaktných staníc nového SMART typu, **budú uskutočnené na mobilnom laboratóriu** (simulátore a optimalizátore energetických systémov), ktoré bolo naprojektované a vyhotovené spoločnosťou REGULTHERM, s.r.o. na základe úžitkového vzoru č. 5749 Spôsob prevádzky kombinovaného stavebno–energetického systému budov a zariadenie.

Na projektovaní aj vyhotovení tohto predmetného mobilného laboratória som sa aktívne zúčastnil už počas štúdia na inžinierskom stupni a kontinuálne som pokračoval aj počas doktorandského štúdia.

Na základe nasledovných meraniach sme upravovali skladbu mobilného laboratória a zapojenie budúceho kompaktného zariadenia.

- a) Odvzdušnenie systému
- b) Kalibrácia meračov a snímačov
- c) Úprava chladiaceho okruhu
- d) Zásahy v procese prevádzky
- e) Ovládanie tepelného čerpadla
- f) Navrhovaný postup prevádzky kompaktného zariadenia
- g) Diagnostika inštalovaných výkonov

3.1 Prístrojové vybavenie mobilného laboratória

V laboratóriu sú inštalované vákuové solárne kolektory, fotovoltaické panely, tepelné čerpadlo vzduch-voda s možnosťou výroby tepla alebo chladu a ventilačná jednotka so spätným získavaním tepla a zásobník TV s elektrickým ohrevom. Vzdialený prístup umožňuje sledovať a nastavovať skutočné a požadované veličiny podľa potrieb vykonávaných meraní. Softvér zaznamenáva merané stavy veličín v päť minútových intervaloch. Softvér vie vytvoriť rôzne časové grafy s priebehom teplôt, vlhkosti, spotreby prípadne stavu nabitia akumulátorov. V prípade potreby vieme všetky hodnoty exportovať do iného výpočtového programu.



Obrázok 3: Laboratórium so vztýčenými solárnymi panelmi [Autor: Matej Kubica]



Obrázok 4: Rozdeľovač a zberač s meracími prístrojmi na strane odovzdávania tepla [Autor: Matej Kubica]



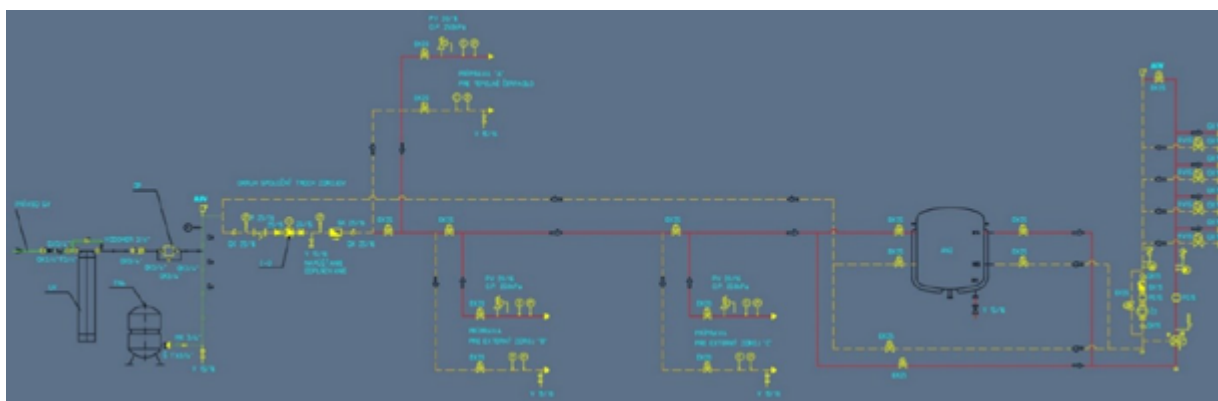
Obrázok 5: Rozdeľovač a zberač s meracími prístrojmi na strane zdrojov tepla [Autor: Matej Kubica]

4 Tvorba a merania na konštrukčných modeloch

Novovytvorené konštrukčné modely budú aplikované v mobilnom laboratóriu. Po konfigurácii zapojenia začneme s meraniami v teréne.

4.1 Konštrukčný model s výrobou tepla - tepor

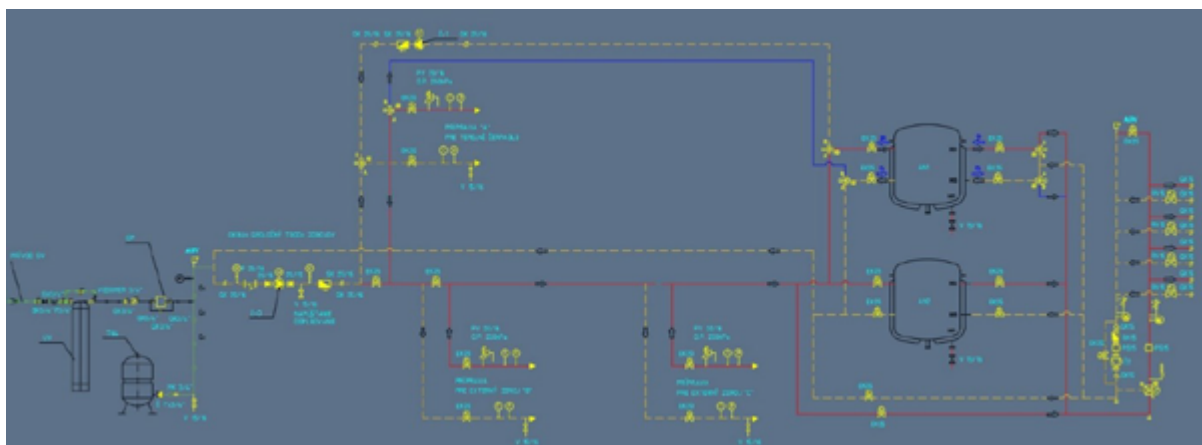
Prevedenie kompaktnej stanice bez reverzibilného tepelného čerpadla a bez schopnosti vyrábať chlad. Kompaktná stanica má tri výstupy pre zdroj, dva s výmenníkom a jeden bez výmenníka. Vďaka chýbajúcemu chladiacemu okruhu má kompaktná stanica iba jeden krátkodobý zásobník. Do tohto typu kompaktnej stanice je možné napojiť aj tepelné čerpadlo s výrobou chladu, ktoré ale bude mať vlastný okruh chladenia a nebude riadené kompaktnou stanicou.



Obrázok 6: Konštrukčný model kompaktnej stanice s výrobou tepla [Autor: Matej Kubica]

4.2 Konštrukčný model s výrobou tepla a chladu - algor

Kompaktná stanica s tepelným čerpadlom so schopnosťou reverzibilnej výroby tepla s prepínaním medzi výrobou tepla a výrobou chladu. V tomto prípade má kompaktná stanica sústavu trojcestných ventilov, ktorá rozdeľuje výrobu chladu a tepla do dvoch okruhov a dovoľuje tak systému vykurovania využívať súčasne chlad aj teplo. Samotná príprava tepla a chladu prebieha prepínaním chodu tepelného čerpadla.



Obrázok 7: Konštrukčný model kompaktnej stanice s výrobou tepla a chladu [Autor: Matej Kubica]

5 Záver

Predinštalované a vopred naprogramované ultrazvukové merače tepla umožňujú vytvárať nové spôsoby získavania údajov a porovnávať projektovaný a skutočný stav. V kompaktnej stanici sú inštalované dve sady ultrazvukových meračov tepla. Zostava zdrojov dokáže zistiť okamžitý výkon a množstvo energie uloženú v zásobníku tepla a chladu. Súbor meračov tepla rozoznáva inštalovaný výkon vykurovacích systémov.

Systém merania a regulácie je kľúčovým pre správne fungovanie vykurovacej sústavy. Progresívne systémy merania a regulácie dokážu okrem kvalitatívneho a kvantitatívneho spôsobu úpravy výkonu upravovať aj tlakové pomery vo vykurovacej sústave. Okrem úpravy prevádzkových vlastností systému systém merania a regulácie zabezpečuje ochranu proti poškodeniu vykurovacích sústav. Meranie a regulácia monitoruje a posiela spätnú väzbu, tak aby bol softvér aktualizovaný včas na ďalšiu akciu.

Literatúra

1. Knihy / Monografie

- [1] Petráš, D.; Lulkovičová, O.; Takács, J.; Furi, B.: Nízkoteplotné vykurovanie a obnoviteľné zdroje energie. Bratislava : Jaga, 2001 : s.98-271 ISBN 80-88905-12-5.
- [2] Quashning V.: Erneuerbare Energien und Klimaschutz : Carl Hanser Verlag Munchen 2008. : s.134-303 ISBN 978-3-446-41444-0
- [3] WATTER, H.: Regenerative Energiesysteme : Springer Fachmedien Wiesbaden 2013. : s.273-304 ISBN 978-3-658-01484-1

2. Patenty a úžitkové vzory

- [4] KALÚS, D.: Preklad európskeho patentového spisu EP 2 572 057 B1. Tepelno-izolačný panel pre systémy s aktívnym riadením prechodu tepla. Pôvodca: doc. Ing. Daniel Kalús, PhD. Dátum vydania európskeho patentového spisu: 15.10.2014. Dátum sprístupnenia prekladu patentového spisu verejnosti: 2.10.2015. Vydal: Úrad priemyselného vlastníctva Slovenskej republiky, Banská Bystrica, 2015, číslo dokumentu E 18881.
- [5] KALÚS, D.: Osvedčenie o zápise úžitkového vzoru č. 5749 Spôsob prevádzky kombinovaného stavebno–energetického systému budov a zariadenie, Banská Bystrica, apríl 2011.

3. Odborné články z internetu

- [6] <https://www.spp.sk/sk/domacnosti/produkty-a-sluzby/spp-smarthome-technologie/vykurovanie/>

Lucia Kudiváni¹

Študijný program: Teória a technika prostredia budov, ročník: 3.

MOŽNOSTI ENERGETICKÉHO HODNOTENIA BUDOVY VYTVORENEJ V BIM

SOFTWARE FOR BIM-BASED ENERGY ASSESSMENT OF BUILDINGS

Abstract

The recent data reveals, that buildings are responsible for approximately 36% of CO₂ emissions in the European Union. Therefore, renovation of existing buildings and sustainable construction of new ones can lead to significant energy savings. Building Information Modelling (BIM) promotes collaboration between disciplines by providing a single 3D CAD model, containing relevant data about a building throughout its life cycle, which can be exported to various function-specific software. In the area of energy assessment, BIM leads to increasing energy performance of building by collaborative work of all professionals, starting by first conceptual design. This study presents the possibility of using BIM software Revit for increasing energy performance of the building in the early stage of design.

Kľúčové slová

BIM; Mass Modelling; Revit Energy Model; Conceptual Design

1. Introduction

The emerging policies on building energy performance developed by the European Union and adopted in national requirements leads to sustainability, low-carbon and environmentally-friendly building sector. Therefore, the means to predict and optimize building energy performance is becoming crucial in Architecture, Engineering, Construction and Operation (AECO) industry.

Today, Building Information Modelling (BIM) is becoming more adopted in building design, construction and operation process. It improves consistency and coordination of contributors integrated in the project, complete documentation with the possibility of optimizing design towards energy efficiency.

2. BIM Software Background

The acronym BIM stands for Building Information Modelling/Management [1]. According to National Institute of Building Sciences in the USA, BIM is described as a digital representation of physical and functional characteristics of a facility. A BIM is a shared knowledge resource for information about a facility forming a reliable basis for decisions during its life-cycle; defined as existing from earliest conception to demolition [2].

¹ Lucia Kudiváni, Ing., Slovak University of Technology, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

The main difference between traditional Computer Aided Design (CAD) software and BIM software is the modelling baseline. CAD software work as digital blueprints allowing higher level of punctuality and efficiency in drafting, or even 3D modelling. In BIM software, 3D elements containing real-world properties are used. This allows to export the model to other programs to produce higher-quality renderings, perform analyses, coordinate with other disciplines, fabricate parts etc. [3].

3. Use of BIM in AECO Industry

The popularity of BIM rises since 2002, when Autodesk released white paper entitled "Building Information Modelling". Since then, this tool has been gaining popularity among AECO professionals. Eastman describes various benefits of BIM, such as increasing building performance and quality, automatic low-level corrections when changes are made to design, earlier collaboration of multiple design disciplines. cost extraction, synchronizations of design and construction and many more [4].

The governments in UK, Denmark, Norway, Sweden, Finland, Netherlands, Singapore, Mainland China, Hong Kong, Korea and Japan are recognizing the key benefits of BIM for their AECO industry and mandating BIM for their government sector projects [5]. On the other hand, Dainty indicate that there is a gap between the positive predictions and the actual implementation of BIM, and that primarily research has focused on larger firms [6].

Different levels of the completeness of a digital model may be implemented. According to American Institute of Architect's Building Information Modelling Protocol levels of development (LOD) range from 100 (basic) to 500 (precise) [7].

UK based National Building Specification (NBS) recognises three levels of BIM, where Level BIM 0 stands for 2D drafting and blueprints, while Level BIM 2 is distinguished by fully collaborative work of all professionals [8].

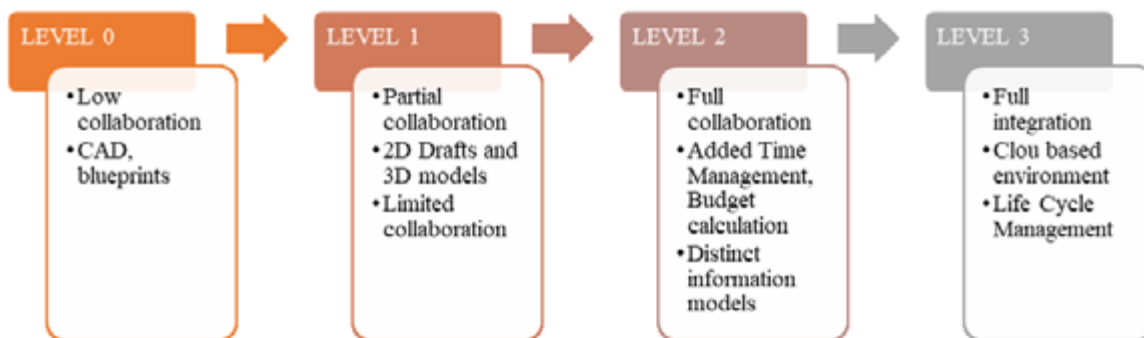


Figure 1: Level of BIM according to National Building Specification

Widely used BIM software to the date are Autodesk BIM 360, Revit, Archicad, SketchUp, Allplan Architecture and many more. They differ in the level of BIM, user interface and compatibility with other designing and scientific tools.

4. Energy Assessment of Buildings

According to the European Commission (EC), buildings are responsible for approximately 36% of CO₂ emissions in the EU [9]. Therefore, renovation of existing buildings and sustainable

construction of new ones can lead to significant energy savings. The new energy performance legislation forces that all new buildings by the 31 December 2020 (31 December 2018 for new buildings occupied and owned by public authorities) are nearly zero energy buildings (nZEB). nZEB means a building, that has a very high energy performance and that low amount of energy should be covered to a very significant extent by energy from renewable sources [10].

The energy performance of the building is calculated, or measured amount of energy delivered and exported actually used or estimated to meet the different needs associated with a standardized use of the building. According to Energy Performance of Buildings Directive [10], the energy performance of a building shall be expressed with a numeric indicator of primary energy use [LK1], based on primary energy factors per energy carrier. For apartment buildings, only heating and domestic hot water are considered, for other buildings also lighting and if applicable ventilation and cooling have to be included. The criteria on the primary energy use for different types of buildings as defined in the Act. No. 324/2016 Coll [LK2]. [11].

The most recent published standard EN 16798-1:2019 [12] focuses on setting new requirement for indoor environmental parameters, especially specifies criteria to be used in standard calculations for indoor environments meant for human consumption.

5. Energy Calculations in BIM

Senave and Boeykens [13] studied the process of energy simulations performed on BIM models, technical abilities, and pointed out issues concerning the relation between BIM and energy simulation in different stages of design. Authors proposed and investigated five energy building simulation examples:

- BIM model used for evaluation according Energy Performance of Buildings (EPB) regulation in EPB software
- BIM model used in an external Building Energy Simulation program
- Energy evaluation integrated within BIM software
- Tools for energy analysis in the early design stages and their link with BIM
- Mass modelling and early energy evaluation within BIM software

In general, the input data for energy assessment of the building are: building geometry and envelope properties, location on the site and weather data, indoor condition and internal loads and building services [14]. Optimization of these parameters may be performed during different stages of the design. However, the ideal and automated integration of multi-criteria design evaluation with BIM is not fully implemented yet. Instead of automatically generating Building Energy Model (BEM), manually re-entering of information into static calculation or dynamic simulation software is common practice [13].

6. BIM Data Formats

Nowadays, numerous of designing tool, simulation programs and BIM software are accessible in the market. The industry has developed two data formats to enable building information exchange between software of various disciplines – IFC and gbXML.

The Green Building XML (gbXML) data format retrieves geometry and non-geometrical information from the model and saves it in a text format under pre-defined notations. The information is divided into three different categories: ShellGeometry, SpaceBoundary and Surface [15]. However,

the use of gbXML is currently only on the energy and ecology simulation domain, as its main advantage is carrying building environmental sensing information. [16].

To unified the market, the official standard ISO 16739-1:2018 for data exchange model was established, called Industry Foundation Classes (IFC). IFC schema contains description of the built environment, including buildings and civil infrastructure. Each object's data are standardized and put in a logical way – **identity** and **semantics** like name and machine-readable unique identifier, **characteristics or attributes** such as material and thermal properties, **relationship** with other object including location and connection, **abstract concepts** like cost or performance, **process** of its installation and operation and list of people who owns or contract the project [17].

7. Conceptual Energy Evaluation of the Building in Revit – A Case Study

In this study, BIM software energy calculation possibilities are demonstrated on Revit Energy Model. Revit has been chosen for its complexity, involving architectural design, mechanical, electrical and plumbing (MEP) disciplines, structural engineering and construction for any type of building. However, in this study only basic design procedure is shown, and full potential of the software will be examined in my further work. The main object of this case study is to present simple way to evaluate energy performance of a building including user-friendly parametric optimization tool Adobe Insight.

7.1 Building Description

The evaluated object is a detached, 7 storey residential building with floor area of 477 m². Height of one storey is 3,0 m, total height is 21,0 m. Building is located in Bratislava. In this case study, no surrounding objects were considered.

During conceptual evaluation, Revit does not require setting specific thermal properties of the envelope. In this case, design is created not by using 3D elements, but only using 2D elements. Pre-set conceptual properties of the envelope of were selected as following:

Table 1: Basic thermal properties of Revit mass model in the presented case study

| Mass model | Construction | R- value ((m ² K)/W) | U-value (W/(m ² K)) |
|--------------------|--|------------------------------------|-----------------------------------|
| Mass Exterior Wall | Lightweight Construction – High Insulation | 4,47 | |
| Mass Roof | High Insulation – Dark roof | 5,63 | |
| Mass Glazing | Triple Pane Clear – LowE Hot or Cold Climate | | 1,26 |
| Mass Shading | Basic opaque shade | - | - |

Default set of HVAC parameters for conceptual evaluation was selected, called Residential 14 SEER/8.3 HSPF Split/Packaged Heat Pump. Revit is based in the USA, therefore pre-set HVAC systems are created by their custom and is described by their standards. Selected HVAC system consists of:

- Efficient 14 SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) /8.3 HSPF (Heating Seasonal Performance Factor) split/package heat pump system
- Residential constant volume cycling fan
- 2.0 inch of water gauge (498 pascals) static pressure Constant Volume duct system

- Integrated differential dry-bulb temperature economizer
- Domestic hot water unit (0.575 Energy Factor)

7.2 Mass Modelling and Energy Model

Firstly, conceptual mass model was created. The volume of the building is framed by 2D elements, however carrying specific thermal properties. Geometry was simplified considering 30 % of glazing area in the envelope.

Energy model was automatically generated from a mass model or architectural model. An energy model is a special form of geometry used for energy simulation engines. The energy model is an abstraction of a building's overall form and layout into a computational network. This network captures all the key paths and processes of heat transfer throughout the building and according to gbXML data format consist of 3 main components: spaces, surfaces, zones.

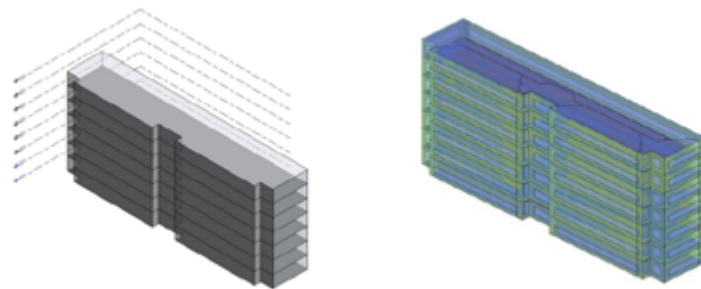


Figure 2 Geometry 3D model (left) transformed to Energy model (right)

7.3 Results Overview

Revit uses cloud simulation engines connected via A360 and Autodesk Insight analysis tool, which considerably shorten computational time. Additionally, Autodesk Insight plug-in offers visually pleasing output, overview of the areas, where is potential to gain higher efficiency and real time feedback on the adjustment (building orientation, thermal properties of building envelope).

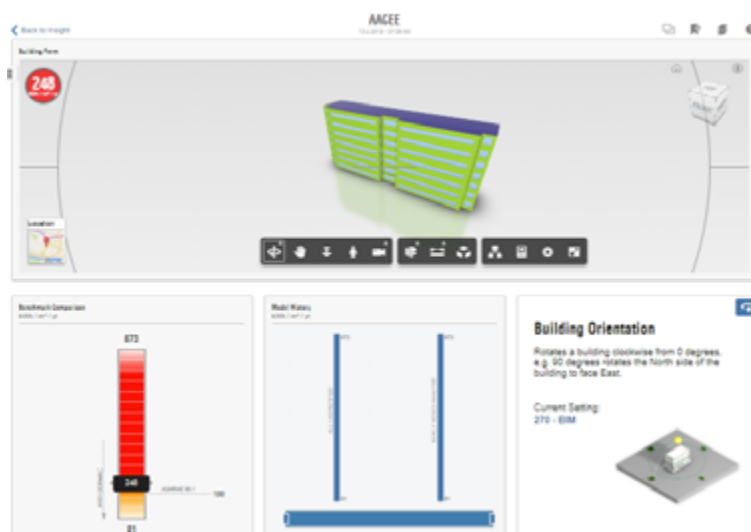


Figure 3 Graphic interface of Autodesk Insight

In the conceptional phase only roughly estimated energy performance is calculated. At the beginning, the software offers mean value of Energy Use Intensity (EUI) for multiple variables with different ranges. The user can additionally specify or adjust selected properties, like Building Orientation, Window-Wall-Ratio, Type of Construction or HVAC Properties, PV panel efficiency of PV surface coverage.

Calculated EUI is adjusted in the real time, offering immediate feedback on the main conceptional changes in the project. The changes can be compared in terms of the energy or cost. Results can be exported to Energy Plus, or other tools, for further examination.



Figure 4 Showcase of an automatic calculation and of EUI in Insight tool when manually adjusting design parameters during conceptional design stage

8. Conclusion

BIM is a useful tool for unifying and automatizing processes within AECO industry. In different stages of design or operation, various model precision level may be used. In this study, use of BIM software for energy calculations during the first – conceptional – stage was presented.

Conceptual energy modelling does not produce the same accurate results as energy modelling with building elements. Rather, this is a process to evaluate and compare design decisions based on a rough schematic model comprised of mass elements representing rooms or zones of a building. While it might seem limited, it is a fast and effective way to predict potential effect of a design decision on the overall efficiency of a building.

9. References

- [1] Race, S.: BIM Demystified (2nd edition). London: RIBA Publishing, 2013. 144 pages. ISBN 978-1-85946-5202.
- [2] [online]. Available: https://www.ace-cae.eu/fileadmin/New_Upload/3._Area_2_Practice/BIM/Other_Docs/1_S.Mordue_Definition_of_BIM_01.pdf

- [3] [online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/learn-explore/caas/video/youtube/lesson/143344-courseId-100332.html>
- [4] EASTMAN, Ch. et al.: BIM Handbook: a guide to building information modelling for owners, managers, designers, engineers, and contractors. New Jersey, John Wiley and Sons, Inc., 2008. 490 pages. ISBN 978-0-470-18528-5.
- [5] CHANG, J., LU, Q.: A review of the Efforts and Roles of the Public Sector for BIM Adoption Worldwide. In: *Journal of Information Technology in Construction*. 2015, vol. 20, pp. 442-478. ISSN 1874-4753.
- [6] DAINTY, A. et al.: Don't believe the (BIM) hype: the unexpected corollaries of the UK 'BIM revolution'. Engineering Project Organizations Conference. 2015
- [7] [online]. Available: <https://bimforum.org/lod/>
- [8] [online]. Available: <https://www.thenbs.com/knowledge/bim-levels-explained>
- [9] [online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings/overview>
- [10] Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings. *Official Journal of the European Union*.
- [11] Act No. 555/2005 Coll. On the energy performance of buildings and in amendments to certain laws
- [12] EN 16798-1:2019. Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1-6
- [13] SENAWE, M., BOEYKENS, S.: Link between BIM and energy simulation. In: *WIT Transactions on the Built Environment*. 2015, vol. 149. pp. 341-352. ISSN 1743-3509.
- [14] Act No. 555/2005 Coll. On the energy performance of buildings and in amendments to certain laws
- [15] IVANOVA, I., KIESEL, K., MAHDAVI, A.: BIM-generated data models for EnergyPlus: A comparison of gbXML and IFC Formats. In: *Proceedings of BS2015: 14th Conference of IBPSA*. Hyderabad, 2015. pp. 407-414. ISBN: 978-93-5230-118-8.
- [16] DONG, B., LAM K. and HUANG, Y.: A comparative study of the IFC and gbXML informational infrastructures for data exchange in computational design support environments. In: *Proceedings: Building Simulation 2007*. Beijing, 2007. pp. 1530-1537.
- [17] [online]. Available: <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/>

INDOOR ENVIRONMENTAL QUALITY EVALUATION IN A NZEB WITH HEAT RECOVERY AND WARM AIR HEATING SYSTEM

Imrich Sánka¹

Teória a technika prostredia budov

Abstract

The European Commission in 2010 accepted Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) and the 2012 Energy Efficiency Directive (EED) are the main energy conservation legislative instruments for to reduce the energy consumption of new built and renovated buildings in Europe. The national regulation based on EPBD states that after the year 2016 only so called ultra-low energy buildings can be built. The next tightening in energy saving will come after 2021 (for commercial buildings after 2019), when only nearly zero energy buildings (NZEB) would be allowed to build. It means that these buildings must fulfil A0 category requirements by energy labelling. But what about the indoor environmental quality in objects like this? This article shows results of indoor environmental quality measurement in NZEB building. Indoor air temperature, relative humidity, carbon dioxide concentration and air exchange rate had been measured. Except these parameters energy consumption from the grid and from the photovoltaic panel had been evaluated.

Keywords

Indoor air quality, indoor environmental quality, nearly zero energy building

1. Introduction

Most of the residential buildings in Slovakia that were built in the 20th century do not satisfy the current requirements for energy efficiency presented in the national building code. [1]

Nationwide remedial measures have been taken to improve the energy efficiency of these buildings and reduce their energy use [2].

From the year 2021, all the newly built buildings will have to comply the most stricter building energy criteria so far in Slovakia. It means that the houses will have to fit into energy class A0 according to the global indicator. Simplistically the primary energy consumption of the buildings mentioned above need to be lower than 54 kWh/(m².a) regarding to family houses, 32 kWh/(m².a) regarding to apartment buildings and 60 kWh/(m².a) regarding to office buildings. provides These buildings are called as nearly zero energy buildings (nZEB).

These requirements can be achieved by perfect application and increased thickness of thermal insulation systems on to building envelope (for example 350 mm of mineral wool to the roof, 200 mm of EPS polystyrene to the external walls and 150 mm of XPS polystyrene to the floor). Of course, the terms for the transparent constructions are as much strict as for the thermal insulation requirements mentioned above.

¹ Ing. Imrich Sánka, Stavebná fakulta STU Bratislava, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

The windows and doors must have heat transfer coefficient lower than 0,6 W/(m².K). In this case the architect has to design top quality windows with triple glazing. These energy saving measures are reducing the U value and are minimizing the heat losses of the building.

Indoor environmental quality (IEQ) refers to all aspects of the indoor environment that affect the health and well-being of occupants. This must include not only air quality but also light, thermal, acoustic, vibration, and other aspects of the indoor environment. With respect to the indoor environment, a healthy building is one that does not adversely affect the occupants. Some authors suggest that it should even enhance the occupants' productivity and sense of well-being to be considered healthy. Thus, it is not only the absence of harmful environmental characteristics but also the presence of beneficial ones that defines a healthy building. Thus, designers should begin by avoiding harmful elements and attempt to incorporate supportive, beneficial ones

The aim of the study was to evaluate the indoor environmental quality in a nearly zero energy building.

2. Building description

The investigated single-family house (Figure 1.) is located in Bad Tatzmannsdorf, Austria. It was built after 2010 from modern materials with good thermal insulation parameters. Four permanent occupants lived in the house, when the measurements were carried out.



Figure 1: The evaluated building

Mechanical ventilation system with heat recovery is installed in the building (Figure 2.) An air-source reversible heat pump is used as heating source, which is connected to the ventilation system – warm air heating by compact heat pump and ventilation unit.

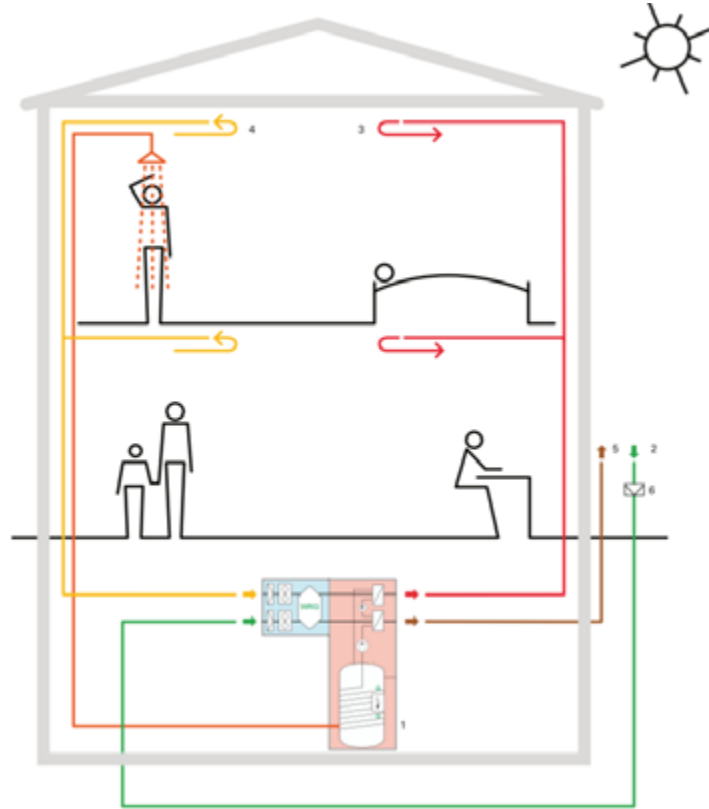


Figure 2: Compact heat pump, unit scheme – DHW, heating, ventilation [drexel-weiss]

The heat is transferred from outgoing to incoming air using the hear recovery system. This type of heating is used in passive houses with very low energy demand.



Figure 3: Compact heat pump, unit photos

3. Methodology

Two rounds of measurements had been completed. The first round of the indoor air quality and thermal environment measurements was performed in summer 2018 when the building was set up to cool the indoor environment. The second round had been performed in January and February 2018 in winter season. This study is presenting the winter season indoor environmental quality measurements.

Three rooms had been selected across the building, where measuring devices were installed:

- Livingroom
- Master bedroom
- Children's room

The same rooms were investigated in both winter and summer seasons over a period of 16 days where temperature, relative humidity and CO₂ concentration, were measured with the following device.

Lutron MCH-383SD

| | | |
|------------|-------------------------------|------------------------|
| Range: | CO ₂ concentration | from 0 ppm to 4000 ppm |
| | Temperature | from 0 °C to 50 °C |
| | Relative humidity | from 10 % to 95% |
| Resolution | CO ₂ concentration | 1 ppm |
| | Temperature | 0,1 °C |
| | Relative humidity | 0,1 % |
| Accuracy | CO ₂ concentration | +/- 40 ppm |
| | Temperature | +/- 0,8 °C |
| | Relative humidity | +/- 0,1% |



Figure 4: Measuring device Lutron MCH-383SD

This device saved the measured values every 5 minute in all the evaluated rooms. Except full time measurements three time periods were defined for the analysis:

- Full time measurements
- Work time
- Free time
- Night time

The data evaluation was carried out according to standards EN 15 251 and EN 7730 (the evaluation categories can be observed in Tab. 1).



Figure 5: Measuring devices in children's room (left) and in livingroom (right)

Categories I. and II. can be accepted according to the thermal environment standard, when the indoor air temperature is between 20-24 °C, while the relative humidity should be between 30 and 70 %.

In case of the indoor air quality the category I, II, and III can be acceptable. category IV can be not acceptable because of there is CO2 concentration higher than the limit, 1000 ppm.

Table 1: Categories of evaluation

| | Temperature (°C) | CO2 concentration (ppm) |
|-------------|--------------------------------|----------------------------|
| I. | 21-23 | <600 |
| II. | 20-24 (except cat. I) | 600-800 |
| III. | 19-25 (except cat. I. and II.) | 800-1000 |
| IV. | <19 - >25 | >1000 |

4. Results

In this section the indoor air quality analysis and the thermal environment evaluation results are presented room by room only from winter measurements.

4.1 Livingroom

The average CO2 concentration in the room was 623 ppm. The measured maximum was 1817 ppm. Only 4 % of the measured time was spent in category IV. Average indoor air temperature was 23,4°C and relative humidity 25,4 %.

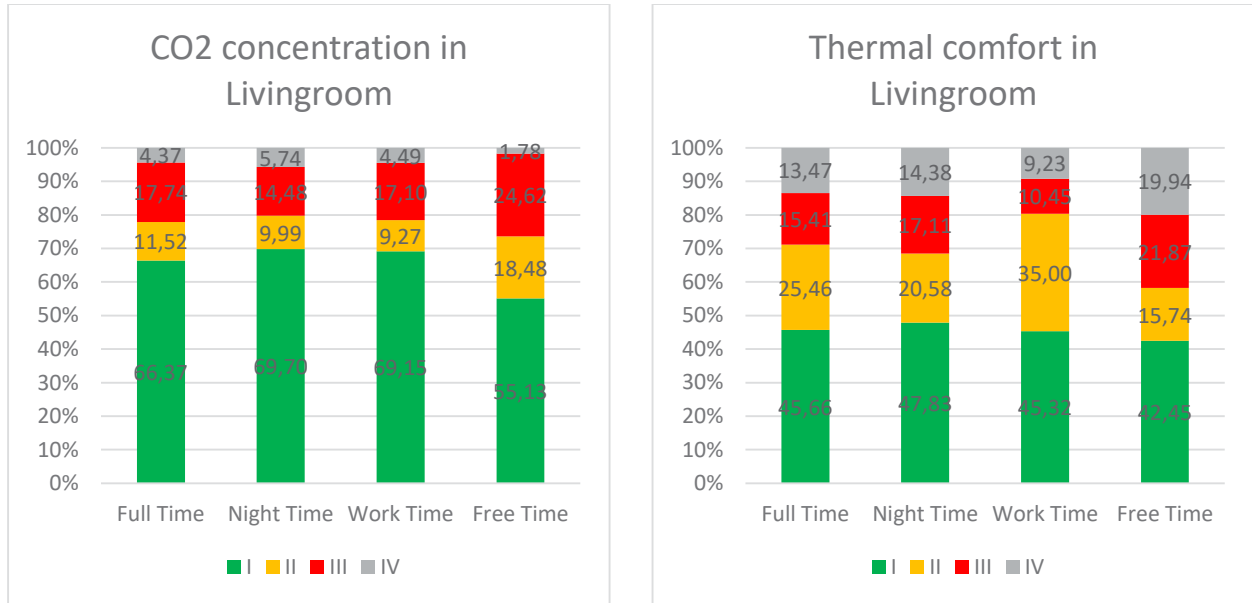


Figure 6: CO2 concentration (left) and thermal comfort (right) in the Livingroom

Table 2: Table data – full time measurements (left), free time measurements (right) - Livingroom

| Full time | Livingroom | | |
|-----------|------------|------|------|
| | CO2 | T | RH |
| | (ppm) | (°C) | (%) |
| AVERAGE | 623.1 | 23.4 | 25.4 |
| MEDIAN | 516 | 23.2 | 25.1 |
| MIN | 465 | 21.2 | 20.4 |
| MAX | 1817 | 26.7 | 32.4 |

| Free Time | Livingroom | | |
|-----------|------------|------|------|
| | CO2 | T | RH |
| | (ppm) | (°C) | (%) |
| AVERAGE | 648.4 | 23.6 | 25.4 |
| MEDIAN | 552 | 23.5 | 25 |
| MIN | 469 | 21.4 | 20.4 |
| MAX | 1274 | 26.6 | 32.4 |

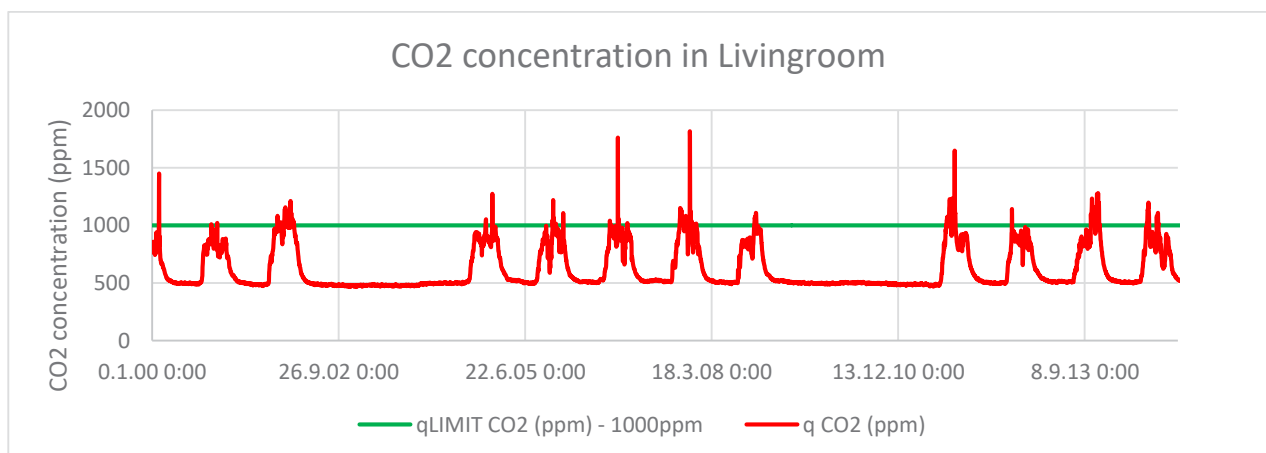


Figure 7: CO2 concentration behaviour during the winter season measurements in Livingroom

4.2 Master bedroom

The average concentration in the room was 575 ppm, at night time 787 ppm. The maximum measured value 1154 ppm at worktime. Thermal comfort parameters are: average temperature 22,7°C and average relative humidity 32,8 %

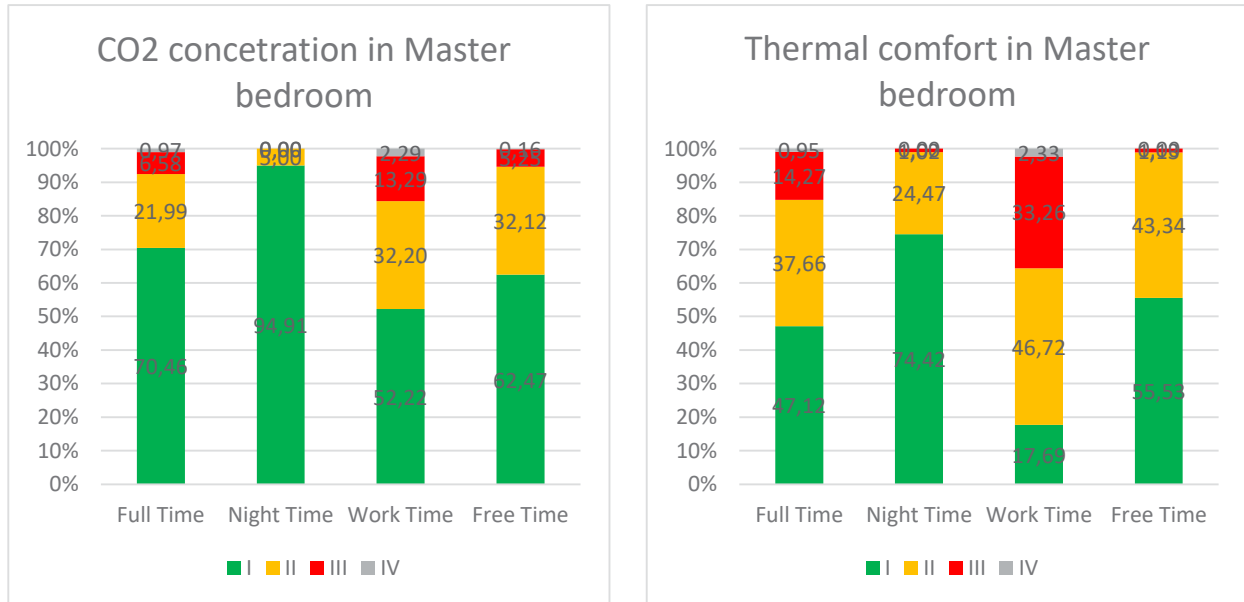


Figure 8: CO2 concentration (left) and thermal comfort (right) in the Livingroom

Table 3: Table data – full time measurements (left), night time measurements (right) – Master bedroom

| Full time | Master bedroom | | |
|-----------|----------------|--------|--------|
| | CO2 (ppm) | T (°C) | RH (%) |
| AVERAGE | 574.8 | 23.2 | 32.8 |
| MEDIAN | 509 | 23.1 | 32.7 |
| MIN | 444 | 21 | 24.1 |
| MAX | 1154 | 25.8 | 44.1 |

| Night Time | Master bedroom | | |
|------------|----------------|--------|--------|
| | CO2 (ppm) | T (°C) | RH (%) |
| AVERAGE | 505.5 | 22.7 | 32.8 |
| MEDIAN | 495 | 22.6 | 33.3 |
| MIN | 446 | 21 | 26.9 |
| MAX | 787 | 24.1 | 40.1 |

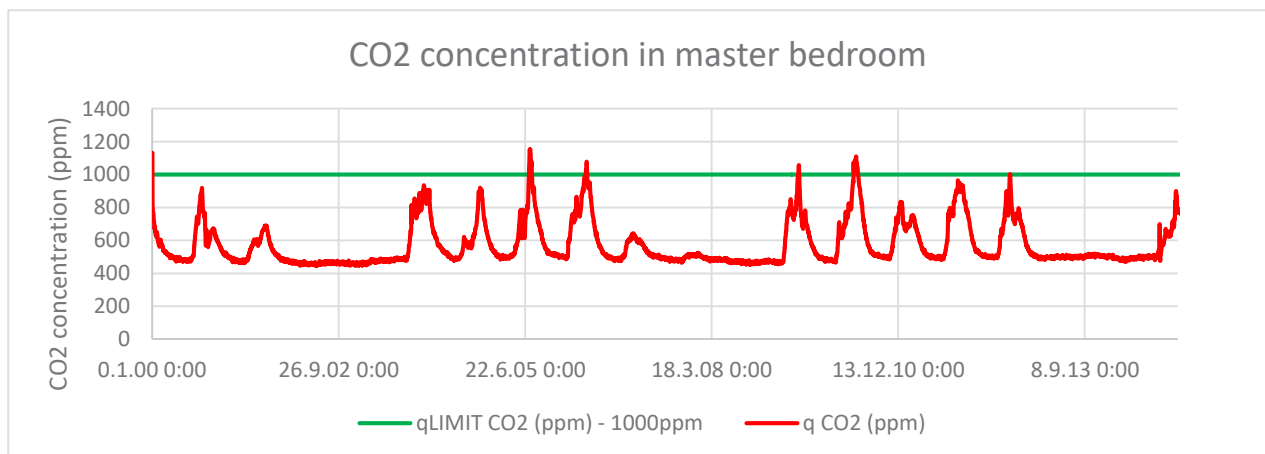


Figure 9: CO2 concentration behaviour during the winter season measurements in Master bedroom

4.3 Children's room

CO2 concentration in average was 587 ppm, maximum measured value was 1241 at worktime. The average room temperature was 22,6 °C and the average relative humidity was 34,8 %

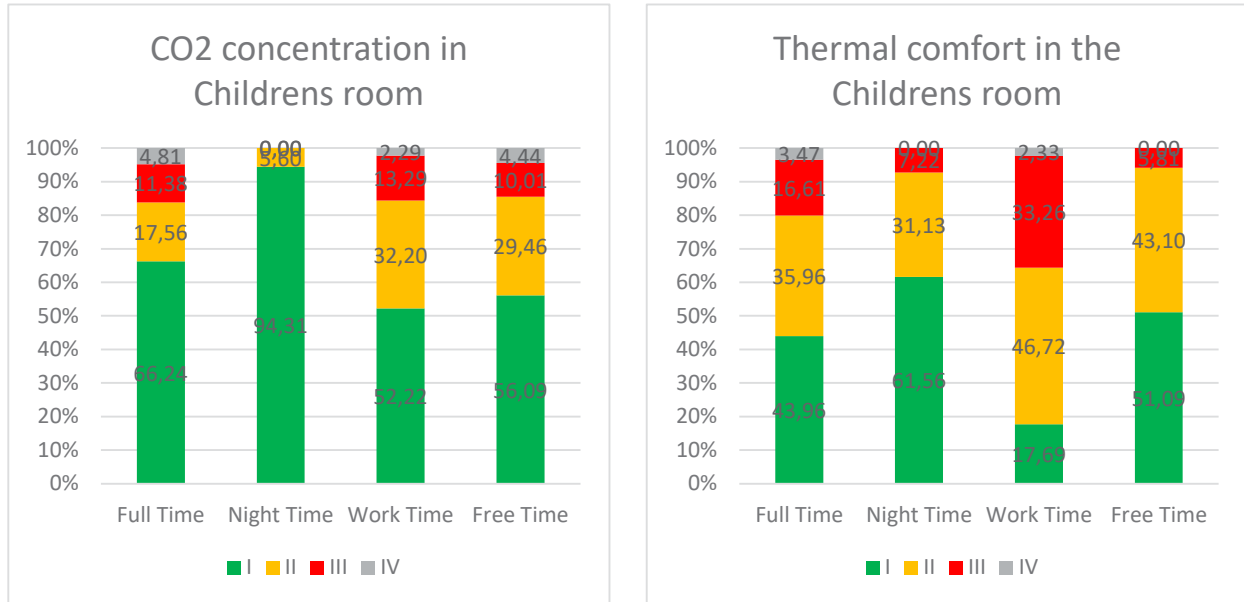


Figure 10: CO2 concentration (left) and thermal comfort (right) in the Livingroom

Table 4: Table data–full time measurements (left), night time measurements (right) –Childrens room

| Full time | Childrens room | | |
|-----------|----------------|--------|--------|
| | CO2 (ppm) | T (°C) | RH (%) |
| AVERAGE | 587.1 | 23.2 | 34.5 |
| MEDIAN | 489.5 | 23.2 | 34.4 |
| MIN | 411.0 | 20.8 | 28.8 |
| MAX | 1241.0 | 26.5 | 43.2 |

| Night Time | Childrens room | | |
|------------|----------------|--------|--------|
| | CO2 (ppm) | T (°C) | RH (%) |
| AVERAGE | 477.8 | 22.6 | 34.8 |
| MEDIAN | 463.0 | 22.6 | 34.7 |
| MIN | 416.0 | 20.8 | 31.2 |
| MAX | 683.0 | 24.2 | 38.4 |

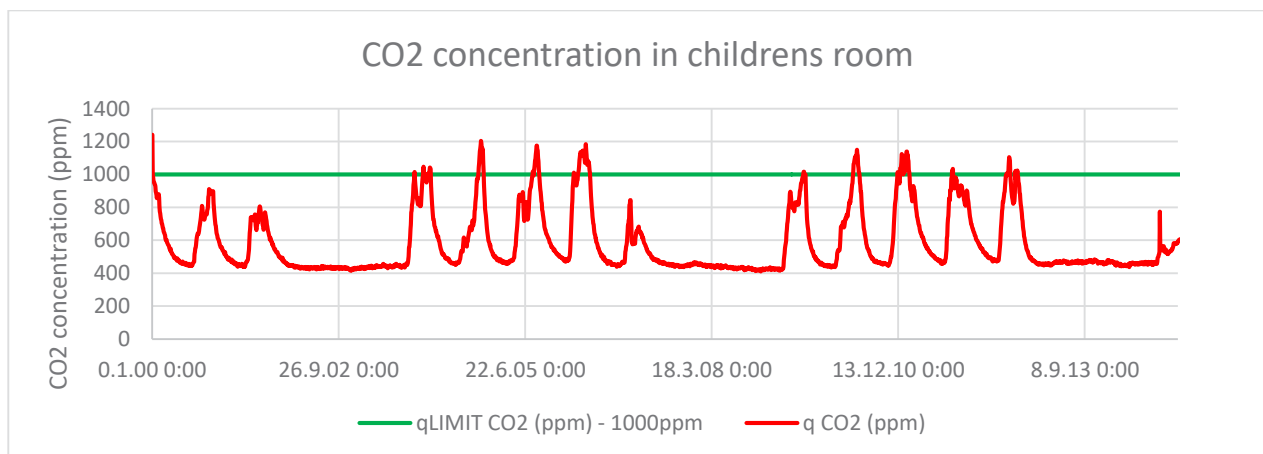


Figure 11: CO2 concentration behaviour during the winter season measurements in Childrens room

5. Discussion

Summarized results of indoor environment quality in the single-family house with three occupants, evaluated in four rooms in winter season showed the following.

Thermal comfort in the evaluated rooms in full time measurements mainly ranged between categories I and II. In the bedroom some peaks had been measured during daytime, which can be explained by the solar radiation through the transparent construction. Only 16% of the measured time was categorized to unacceptable categories (15,43% in c. III. And 4,47% in c. IV.) The average temperature was 23,4 °C for evaluated rooms in winter season, which is acceptable.

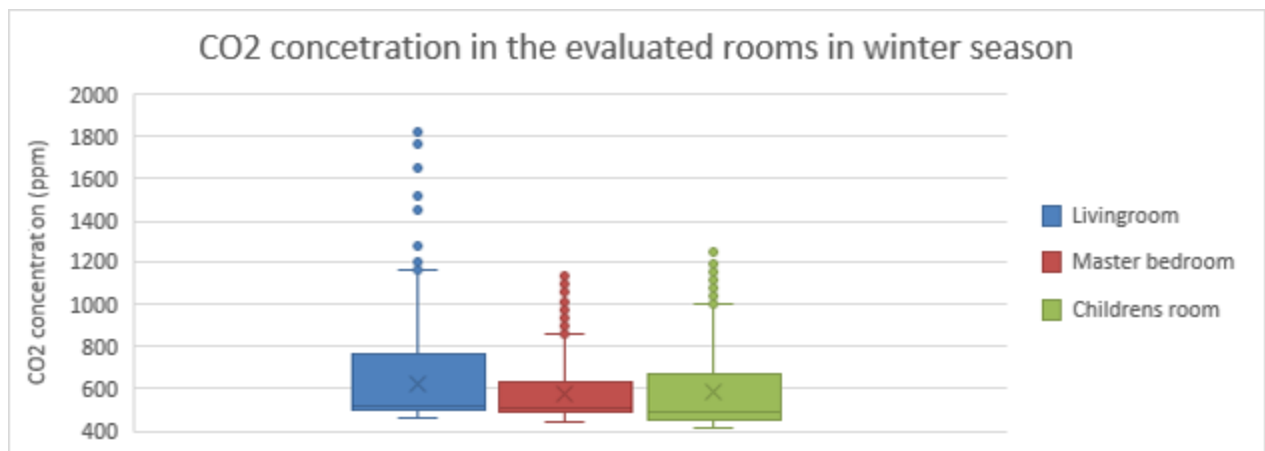
Relative humidity was very low, the average from the measured values was 30,9 %.

The CO₂ concentration crossed the 1000 PPM limit only: 5,96 % in full time measurements.

The average indoor air quality for the evaluated rooms is the following:

Table 5: Indoor air Quality in the evaluated rooms perceptually categorized based on the spent time in time in the category

| categorized IAQ (qCO ₂) | Livingroom | | | | Master bedroom | | | | Childrens room | | | |
|---|------------|-------|-------|------|----------------|-------|-------|------|----------------|-------|-------|------|
| | I | II | III | IV | I | II | III | IV | I | II | III | IV |
| Full Time | 66.37 | 11.52 | 17.74 | 4.37 | 70.46 | 21.99 | 6.58 | 0.97 | 66.24 | 17.56 | 11.38 | 4.81 |
| Night Time | 69.70 | 9.99 | 14.48 | 5.74 | 94.91 | 5.00 | 0.00 | 0.00 | 94.31 | 5.60 | 0.00 | 0.00 |
| Work Time | 69.15 | 9.27 | 17.10 | 4.49 | 52.22 | 32.20 | 13.29 | 2.29 | 52.22 | 32.20 | 13.29 | 2.29 |
| Free Time | 55.13 | 18.48 | 24.62 | 1.78 | 62.47 | 32.12 | 5.25 | 0.16 | 56.09 | 29.46 | 10.01 | 4.44 |



6. Conclusion

Indoor air quality is a dominant contributor to total personal exposure because most people spend a majority of their time indoors [7]. The findings presented in this measurement campaign further support the conclusions of previous studies [2][3][4] that mechanical ventilation helps set up a healthier and more comfortable indoor environment.

The study showed that to the building (full time measurements) provided fresh air (average CO₂ concentration below 600ppm) and thermal comfort parameters shows 23,5°C in the whole building. Lots of studies have also attributed this phenomenon that the new built buildings are very tight. This can cause indoor environment quality problems, which primary lead to sick building syndrome. Mechanical ventilation system and modern environmental technology can insure the

proper indoor environmental quality. The validation of the results on a larger sample size is warranted. The study is ongoing, and additional results will be available in the near future.

Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Education, Science, Research and Sport under VEGA Grants 1/0807/17 and 1/0847/18 and KEGA 044STU-4/2018.

References

- [1] Jurelionis A., Seduikyte L. (2010) Assessment of indoor climate conditions in multifamily buildings in Lithuania before and after renovation. 2nd International conference advanced construction. Kaunas, Lithuania.
- [2] Földváry V., Bekö G., Petráš D. (2014) Impact of energy renovation on indoor air quality in multifamily dwellings in Slovakia. Proceedings of Indoor Air 2014, Hong Kong, Paper No. HP0143. Arash Rasooli, Laure Itard, Carlos Infante Ferreira, "Rapid, transient, in-situ determination of wall's thermal transmittance," in *Rehva Journal*, vol. 5, 2016, pp16-20.
- [3] Földváry V., Bekö G., Petráš D. (2015) Seasonal variation in indoor environmental quality in non-renovated and renovated multifamily dwellings in Slovakia. Proceedings of Healthy Buildings Europe 2015, Eindhoven, Paper ID 242.
- [4] Földváry V. (2016) Assessment of indoor environmental quality in residential buildings before and after renovation. Doctoral thesis. Bratislava, Slovakia.
- [5] Bekö G., Földváry V., Langer S., Arrhenius K. (2016) Indoor air quality in a multifamily apartment building before and after energy renovation. Proceedings of the 5th International Conference on Human-Environment System, ICHES 2016 Nagoya, Japan.
- [6] Persily A. K. (1997) Evaluating Building IAQ and Ventilation with Indoor Carbon Dioxide. ASHRAE Transactions. 103, Vol. 2.
- [7] N. Klepeis, W. C. Nelson, W. R. Ott et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 11, 2001, pp. 231–252.
- [8] Kotol M., Rode C., Clausen G., Nielsen T. R. (2014) Indoor environment in bedrooms in 79 Greenlandic households, *Building and Environment*, Vol. 81, pp. 29-36.
- [9] Bekö G., Toftum J., Clausen G. (2011) Modelling ventilation rates in bedrooms based on building characteristics and occupant behaviour. *Building and Environment*, Vol 46, pp. 2230-2237.
- [10] Sánka I., Földváry V., Petráš D. (2016) Experimentálne meranie CO₂ a intenzity výmeny vzduchu v bytovom dome. *TZB-Haustechnik*, Vol 25, pp. 46-49.
- [11] Sánka I., Földváry V., Petráš D. (2017) Evaluation of Indoor Environment Parameters in a Dwelling before and after renovation. *Magyar épületgépészet* Vol, 65, pp. 29-33.
- [12] Sánka I., Földváry V., Petráš D. (2017) Experimentálne meranie toxických látok vo vnútornom vzduchu pred a po obnove bytového domu. *TZB-Haustechnik*, Vol 26. 2/2017, pp. 32-35

THEORY AND STRUCTURES OF BUILDINGS

Matthias Marcel Jean Arnould

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb¹

POTENCIÁL CIRKULÁRNEJ EKONOMIKY V ARCHITEKTÚRE 21. STOROČIA

THE POTENTIAL OF CIRCULAR ECONOMY IN THE ARCHITECTURE OF THE 21ST CENTURY

Abstract

The protection of the environment is becoming the topic of the present. The faster the common natural resources are depleted, the more often we will encounter the reuse of materials in construction practice. Nowadays, the most common way for developers is to rely on cheap, aesthetically attractive, profitable construction solutions. However, this approach is not sustainable because the operating costs, life cycle or environmental aspects of the project are not of interest to them. On the other hand, in some countries, architects have been using circular design in construction for years. These organizations were able to assert themselves on the European market, thanks to the combination of research, network and executive branch. The article focuses on an analysis of circular design, its advantages and unexplored potential in the architecture of the 21st century.

Kľúčové slová

Cirkulárna ekonomika, cirkulárny dizajn, recyklovanie, stavebný odpad

1. Predstavenie cirkulárnej ekonomiky a jej aktuálnosť vo svete

1.1 Východisková situácia

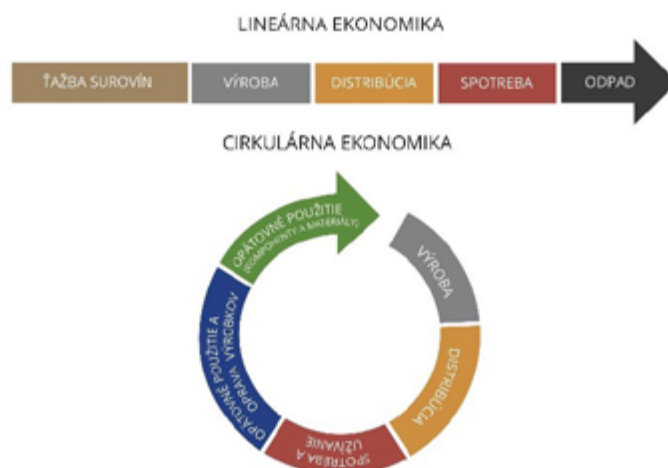
V súčasnosti sa kladie veľký dôraz na znižovanie primárnych energií, či už ide o novostavbu alebo ide o rekonštrukciu. Tento celosvetový trend je ovplyvnený globálnym znečisťovaním životného prostredia našej Zeme. Dôvodom je naša konzumná spoločnosť, nárast populácie ako aj zvyšovanie životného štandardu. Európska únia a jej členské štáty sa snažia, určitými opatreniami, zredukovať toto znečisťovanie a hľadajú možné riešenia, ktoré by spomalili tento nárast. Od roku 2020 bude musieť byť každá občianska stavba, na území Slovenskej republiky, navrhnutá skoro s nulovou spotrebou energie na vykurovanie. Jedná sa však o tak rozsiahlu problematiku, že sa týka všetkých profesijných oblastí v stavebníctve (od architektúry po technológie). Pri efektívnej spolupráci všetkých špecialistov, ktorý by v návrhu zohľadňovali aj ekonomickú, aj ekologickú stránku projektu je možné výrazne redukovať primárnu energiu. Ekonomický model lineárnej ekonomiky v súčasnosti vo všetkých druhoch priemyslu pomaly nahrádza model cirkulárnej ekonomiky. Model cirkulárnej ekonomiky však v architektonickej praxi nie je zaužívaný. Jedná sa len o akési fragmenty, či pokusy o jeho využitie. Na druhej strane je to téma, ktorá je aktuálna a treba sa jej venovať. Zdroje na našej planéte nie sú neobmedzené. Recyklácia nepredstavuje konečné a zároveň ani atraktívne riešenie, keďže jej procesy sú energeticky náročné a vo všeobecnosti znamenajú degradáciu materiálov. Na

¹ Matthias Marcel Jean, Arnould, Ing., Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava-Staré Mesto-Bratislava, Slovensko

druhej strane, nahrádzanie primárnych materiálov sekundárnymi môže poskytnúť aspoň čiastočné riešenie.

1.2 Predstavenie cirkulárnej ekonomiky

Cirkulárna ekonomika je regeneračný systém, v ktorom sú minimalizované zdroje a odpad, emisie a únik energie spomalením, zatváraním a zužovaním energetických a materiálových slučiek. To sa dá dosiahnuť dlhodobým návrhom, údržbou, opravou, opätovným použitím, opätovnou výrobou, renováciou, recykláciou a s „upcycling“. Tento systém je v rozpore s lineárnou ekonomikou, ktorá je označovaná aj ako systém "take, make, dispose". [1]



Obr.1: Porovnanie lineárnej a cirkulárnej ekonomiky (www.inciem.org)

Hlavnou výhodou cirkulárneho hospodárstva je fakt, že jeho aplikácia nevyžaduje zmeny v kvalite života spotrebiteľov, nevyžaduje stratu príjmov a ani nepredstavuje dodatočné náklady pre výrobcov a iných hospodárskych subjektov. Obchodné modely cirkulárnej ekonomiky môžu byť rovnako výnosné ako lineárne modely a zároveň umožňujú spotrebiteľom, aby si užívali podobné výrobky a služby. Na dosiahnutie modelov, ktoré sú ekonomicky a environmentálne udržateľné, sa cirkulárne hospodárstvo zameriava na oblasti, ako je návrhové myslenie, systémové myslenie, predlžovanie životnosti výrobku a recyklácia.

1.3 Sedem elementov cirkulárnej ekonomiky

Cirkulárna ekonomika zaznamenala v posledných rokoch výrazný nárast záujmu. S týmto nárastom popularity mnoho organizácií spomína termín "cirkulárna ekonomika" alebo "cirkulárne princípy" bez toho, aby skutočne vedeli, čo znamenajú. Na druhej strane, ak je termín definovaný, definícia sa značne líši v závislosti od riešených problémov, publika alebo pohľadu autora na svet.

V snahe definovať spoločný jazyk pre cirkulárnu ekonomiku, organizácia Circle Economy analyzovala rôzne pojmy a definície, ktoré v súčasnosti používa viac ako 20 organizácií - mimovládne organizácie, vládne agentúry, akademické inštitúcie atď. Po interpretácii a zoskupení týchto pojmov sa vykryštalizovalo sedem kľúčových prvkov, ktoré zadefinovali väčšinu pojmov spojených s cirkulárnou ekonomikou. Sú to:

1. uprednostniť obnoviteľné zdroje - Zabezpečiť, aby sa obnoviteľné, opakovane použiteľné, netoxické zdroje využívali účinne ako materiál a energia.

2. zachovať a predĺžiť životnosť existujúceho materiálu – Existujúce zdroje v prevádzke sa udržiavajú, opravujú a modernizujú, aby maximalizovali svoju životnosť a poskytli druhý život prostredníctvom stratégií spätného odberu, ak je to vhodné.
3. použiť odpad ako zdroj - Využívanie odpadových tokov ako sekundárnych zdrojov a zhodnocovanie odpadu na opätovné použitie a recykláciu.
4. zmeniť biznis model a naše myslenie - Zvážte príležitosti na vytvorenie väčšej hodnoty a zosúladienie stimulov prostredníctvom obchodných modelov, ktoré stavajú na interakcii medzi produktami a službami.
5. navrhovať pre budúcnosť - Zohľadnite perspektívu systémov počas procesu návrhu, používajte správne materiály, navrhujte ich na primeranú životnosť a navrhujte ich pre rozšírenie v budúcnosti.
6. začleniť digitálnu technológiu na správnu reguláciu - Sledovanie a optimalizácia využívania zdrojov a posilnenie prepojení medzi aktérmi dodávateľského reťazca prostredníctvom digitálnych, online platforiem a technológií, ktoré poskytujú dostatočný prehľad.
7. spolupracovať na vytvorení spoločnej hodnoty - Spolupracujte v celom dodávateľskom reťazci, vnútorne v rámci organizácií a s verejným sektorom, aby ste zvýšili transparentnosť a vytvorili spoločnú hodnotu. [2]



Obr. 2: Sedem elementov cirkulárnej ekonomiky (www.circle-economy.com)

2. Cirkulárna ekonomika v architektúre

2.1 Cirkulárny dizajn ako piaty element cirkulárnej ekonomiky

Cirkulárny dizajn je o vytváraní produktov, služieb a systémov v súlade s cirkulárnou ekonomikou. Tento dizajn sa musí riadiť tromi princípmi – navrhovať s využitím odpadu, zabezpečiť aby materiály zostali v obehú a regenerovať prírodné systémy. Je dôležité vnímať požiadavky konkrétneho klienta (dalo by sa povedať o aplikovaní empatie) a tieto požiadavky kombinovať tak, aby nenarušali hlavný ekosystém. Súčasný dizajn sa bohužiaľ dnes zameriava na produkty, ktoré počas ich užívania pôsobia kvalitne, funkčne a príjemne, avšak väčšina z nich má krátku životnosť a končí vždy na jednom mieste, na skládkach. [3]

2.2 Cirkulárna ekonomika v architektúre 21. storočia

V celosvetovom meradle je ekologická architektúra na výsluní. Vznikajú hodnotiace systémy udržateľných budov (napr. BREEAM, LEED, Green Star, GreenClobe, GBTool, PromisE, SBTool, SBTool.CZ, SATool, CASBEE, MARS-SC a pod.), ktoré sa snažia vytvoriť kritériá stavebno-ekologickej kvality. Po splnení daných kritérií sa podľa daného systému dostáva budova na klasifikačný stupeň, ktorý vypovedá o jej kvalite z hľadiska udržateľnosti. Hodnotenie je dobrovoľné a väčšinou bohužiaľ slúži len ako marketingový nástroj.

Náš súčasný model navrhovania, stavania či búrania pomaly zaniká a je nahrádzaný novým. Touto problematikou sa zaoberá mnoho odborníkov a inštitúcií po celom svete. Výskumy sa zameriavajú na materiály a technológie použité v objektoch, ktoré by mali mať priaznivý dopad na životné prostredie a na vnútorné prostredie budov. Ďalej sa výskumy zaoberajú aj udržateľnou spoločnosťou, kde je hlavným článkom človek a nie technické riešenia. Trvalo udržateľný rozvoj je ťažko definovať v rámci platnej legislatívy, no aj tak je potrebné sa o to snažiť. Problémom všetkých výskumov je podrobná analýza jednej problematiky v rámci udržateľnosti. Výskumy neriešia komplexné riešenia, alebo variácie, ktoré by zohľadňovali viacero faktorov pri návrhu ako napríklad: obnoviteľné zdroje, tvorbu odpadu, obehové systémy, znižovanie primárnych energií ako aj ekonomický aspekt, vzájomný networking a ďalšie.

2.3 Prepojenie teórie s praxou – Lendager Group

Spomedzi mnohých spoločností, ktorým sa v zahraničí úspešne darí, by som rád spomenul spoločnosť Lendager Group. Táto spoločnosť sa špecializuje na podporu cirkulárneho hospodárstva v mestách budúcnosti, a to v troch rovinách pod názvami: Lendager TCW, Lendager ARC a Lendager UP. Tento jedinečný interdisciplinárny prístup k práci uľahčuje identifikáciu udržateľných potenciálov pre spoločnosti, verejnú správu a ďalšie organizácie, ako aj vytvára ponuky a konkrétne riešenia problémov. Bez ohľadu na to, či je projekt vyvíjaný jednou spoločnosťou alebo v spolupráci všetkých troch spoločností, vždy sa realizuje s pevným základom celostnej udržateľnosti, a preto aj konečný produkt bude vždy usilovať o implementáciu sociálnych, ekonomických a environmentálnych aspektov.

Lendager Group ponúka inovatívny prístup k obehovému hospodárstvu a nových obchodných modelov. Prispievajú k vytváraniu budúcnosti, kde je hospodársky rast oddelený od emisií skleníkových plynov. Ich snahou je preukázať, že teórie a ambície môžu byť preklopené do hmatateľných výsledkov.

Lendager TCW bol vytvorený za účelom byť jednou z hnacích síl udržateľnej revolúcie v Dánsku. Vďaka komplexným znalostiam cirkulárnej ekonomiky skúmajú potenciál a vyvíjajú stratégie pre organizácie, ktoré sa chcú dozvedieť, ako sa udržateľnosť môže stať základným parametrom v ich podnikaní. Ako konzultanti ponúkajú rôzne analýzy, stratégie a workshopy, týkajúce sa efektívneho využívania zdrojov a materiálových tokov.

Lendager UP poskytuje znovu použité „upcycled“ stavebné materiály a bol zahájený potom, čo zaznamenali rastúci dopyt po lokálne vyrábaných „upcycle“ produktoch. So znalosťami o zdrojoch odpadu s potenciálom, ako aj inovatívnym prístupom k vývoju produktov, Lendager UP vie, ako vytvárať estetické výrobky, ktoré spĺňajú všetky technické, environmentálne a legislatívne požiadavky.

A napokon spoločnosť Lendager ARC (od slova architecture) bola založená s cieľom sa stať hlavnou architektonickou kanceláriou v Dánsku, zameranou na udržateľné navrhovanie. Ako architekti, urbanisti a konzultanti zabezpečujú integráciu udržateľnosti do projektov už od prvého náčrtu či stretnutia. V súčasnosti sa Lendager ARC darí vyhrávať najprestížnejšie architektonické súťaže a následne ich realizuje. Posledným veľkým projektom je UN17 Village, víťazný návrh, vďaka ktorému v nasledujúcich rokoch vznikne historicky prvý eko-satelit v extraviláne mesta Kodaň. [3]



Obr. 3: UN17 Village je prvým stavebným projektom na svete, ktorý aplikuje všetkých 17 cieľov OSN v oblasti trvalo udržateľného rozvoja. (www.lendager.com)

3. Záver

Pojem „udržateľný rozvoj“ považujem za oxymoron. Na druhej strane, pre tzv. udržateľnú architektúru je čoraz ľahšie zdefinovať jej smer. Jedná sa o veľmi komplexnú vedu, ale dopad navrhovanej architektúry na životné prostredie je pomerne ľahko merateľný. Posudzuje sa predovšetkým celoživotný cyklus stavby, od ťažby, cez výstavbu a prevádzku až po odstránenie, v lepšom prípade rozobratie stavby. Cirkulárna architektúra sa dnes rýchlo dostáva do popredia a to nie len preto, že výrazne šetrí životné prostredie. Po rokoch výskumu sa cirkulárna architektúra stala predovšetkým dostatočne funkčnou a esteticky atraktívnou aj pre bežného klienta. Viacerí odborníci sa preto zhodujú, že pokiaľ bude udržateľnosť dostatočne krásna, dokáže na trhu preraziť.

Literatúra

[1] INCIEN. Cirkulárna ekonomika [online]. [Bratislava (Slovakia)] : Jan. 2016 [cit. 2019-10-01]. Dostupné na internete: <https://www.inciен.sk/cirkularna-ekonomika/>

[2] CIRCLE-ECONOMY. The 7 key elements of the circular economy [online]. [Bratislava (Slovakia)] : May 2014 [cit. 2019-10-01]. Dostupné na internete: <https://www.circle-economy.com/the-7-key-elements-of-the-circular-economy>

[3] CIRCLE-LAB. Design for the future - [online]. [Bratislava (Slovakia)] : May 2014 [cit. 2019-10-01]. Dostupné na internete: <https://circle-lab.com/knowledge-hub/circular-economy-strategies/design-future>

[4] LENDAGER GROUP. Lendager ARC, Lendager UP, LENDAGER TCW - [online]. [Bratislava (Slovakia)] : Nov. 2018 [cit. 2019-10-01]. Dostupné na internete: <https://lendager.com/en/about-us/>

Adam Blažo¹

Štúdijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, 3. ročník

APLIKÁCIA VÁKUOVÉHO ZASKLENIA NA RÔZNYCH PROFILOVÝCH RIEŠENIACH DREVENÝCH OKIEN – POROVNANIE VNÚTORNÝCH POVRCHOVÝCH TEPLÔT

APPLICATION OF VACUUM GLAZING ON VARIOUS WOODEN WINDOW PROFILE SOLUTIONS - COMPARISON OF INTERNAL SURFACE TEMPERATURES

Abstract

Due to increasing demand for energy consumption in buildings, building component producers are compelled to improve the parameters of their products. The window is a building element that has several functions: it provides daylight, ventilation, noise protection and ensures visual contact with the surrounding environment. However, it is the weakest part of the building envelope. Currently produced insulated windows consist of several parts - frame, glazing system, warm edge spacer. In this article, we are focusing on the application of vacuum glazing into wooden windows produced nowadays.

Kľúčové slová

vákuové zasklenie, drevený rám, povrchová teplota, zasklievacia drážka, okrajové tesnenie, dištančný pilierik, korok

1. Úvod

Profilové riešenia a sklené systémy štandardne vyskytujúce sa na trhu nedokázali dosiahnuť prvotne požadovanú hodnotu po roku 2020 (verejné budovy po roku 2018) $U_w \leq 0,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Táto musela byť zmenená a v súčasnosti sa normou požadovaná hodnota po roku 2020 zmenila z 0,6 na $0,85 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ a doplnila sa odporúčaná $0,65 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. V súčasnosti ponúkané produkty len veľmi ťažko dosahujú požadované hodnoty. Zasklenie tvorí väčšinou plochu okna a tým výrazne ovplyvňuje jeho vlastnosti. Súčasným štandardom v strednej Európe je aplikovanie izolačného trojskla v nových okenných konštrukciách. Inštalácia izolačného trojskla tvorí už väčšinový podiel na trhu. Trendy vo vývoji skiel smerujú ku konštrukcii ľahších a tenších sklenených tabúľ. Pozornosť treba venovať aj na stavebnú fyziku a transport tepla – vedenie tepla materiálmi, žiarenie a konvekciu v medzisklennom priestore. Na elimináciu žiarivej zložky tepelného toku sa aplikujú nízkoemisné povlaky.[1]

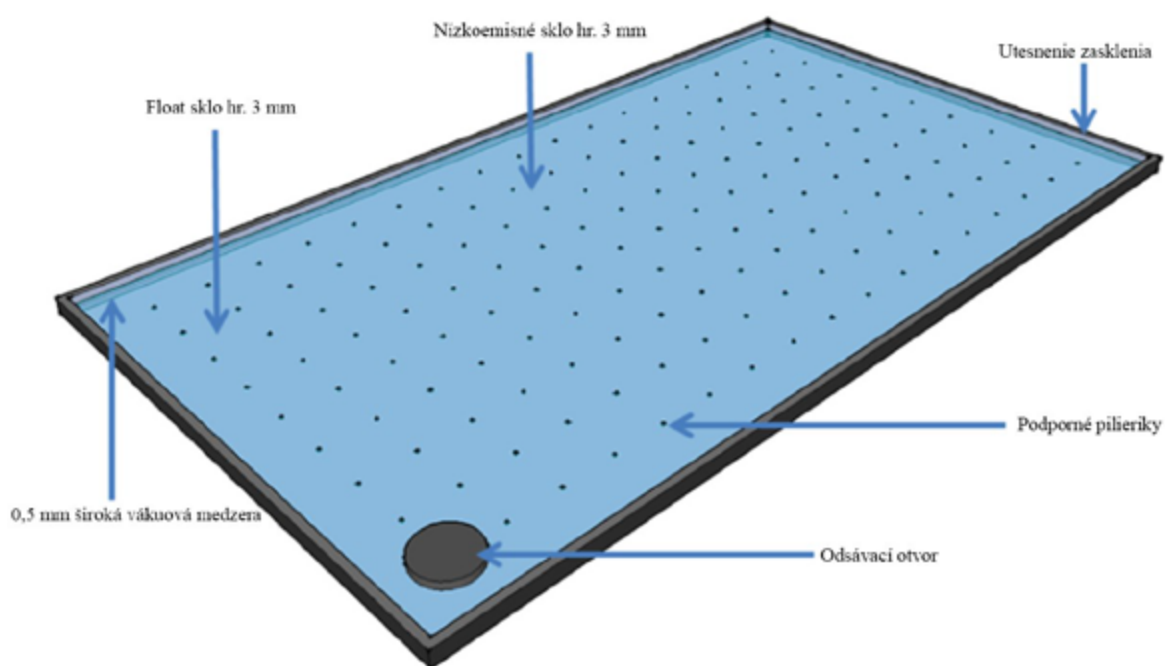
Existujú dva možné smery vo vývoji zasklievacích systémov:

- viac užších medzisklenných priestorov vyplnených vzácnymi plynmi a s tenšími tabuľami skla
- odsatie vzduchu z medzisklenného priestoru – vákuové zasklenia

¹ Adam Blažo, Ing., Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta, Katedra konštrukcií pozemných stavieb, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Vákuové zasklenia

Vákuové zasklenie je unikátny a vysokoúčinný zasklievací systém, ktorý minimalizuje tepelné straty v tenkej konštrukcii. Prvá myšlienka na konštrukciu prototypu vákuového zasklenia bola predstavená DI Alfredom Zollerom v roku 1913, ktorý však nebol vyrobený. Prvý úspešný prototyp bol vyrobený v roku 1989 profesormi Robinsonom a Collinsom na Univerzite v Sydney. Tento prototyp však využíval technológiu utesnenia okraja zasklenia s teplotami vyššími ako 450 °C. Konštrukcia vákuového zasklenia je principiálne jednoduchá. Konvenčne vyrábané vákuové sklá pozostávajú z dvoch tabúľ skla oddelených od seba sieťou dištančných pilierikov. Vzďialenosť pilierikov od seba je dostatočne veľká a ich rozmery zasa malé, takže ich vplyv na viditeľnosť cez zasklenie je zanedbateľná. Kľúčovou prednosťou vákuového zasklenia je, že pri vákuu sa eliminuje konduktívna a konvektívna zložka tepelného toku. [2]

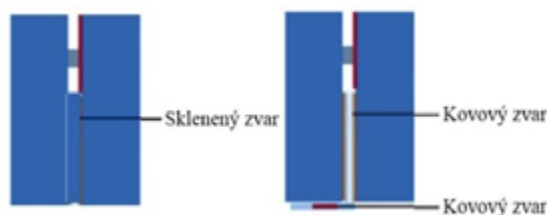


Obr. 1: 3D schématické zobrazenie konvenčne vyrábaného vákuového zasklenia – dvojsklo (2)

2.1 Komponenty a výrobný proces komerčne vyrábaných vákuových skiel

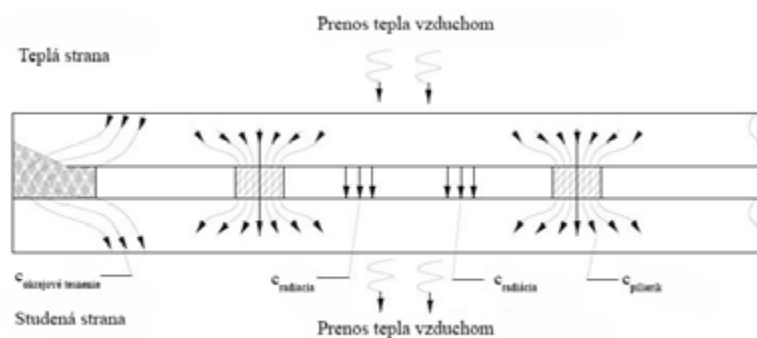
Základné komponenty vákuového zasklenia:

- Okrajové tesnenie: vo všetkých ázijských výrobkoch sa používa na utesnenie sklenený zvar, zatiaľčo európske výskumné centrá sa snažia o pokusy tesnenia na báze kovov (cín a iné. – doteraz nie veľmi úspešné)
- Dištančné pilieriky: vyrobené z nehrdzavejúcej ocele alebo keramiky
- Vákuová medzera: najčastejšie tlak vo vákuu menší 0,01 Pa, so šírkou vákuovej medzery v rozmedzí od 0,15 do 0,20 mm.



Obr. 3: Tesnenie na báze skleneného a kovového zvaru (©ZAE Bayern)

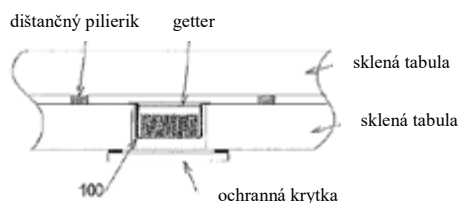
Pre tepelnú výkonnosť vákuového zasklenia je dôležitý rozmer pilierikov, tvar a trvanlivosť okrajového tesnenia ako aj hodnota emisivity nízkoemisného povlaku. Tepelné toky cez fragment vákuového zasklenia sú uvedené na obr. 4.



Obr. 4: Tepelné toky cez vákuové sklo (1)

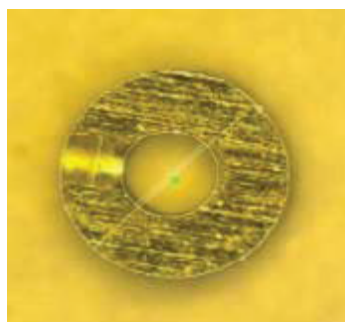
Najdôležitejším komponentom vákuového zasklenia je jeho vákuová medzera medzi tabuľami skla. Hodnota by mala byť menšia ako 0,1 Pa, (najideálnejšie 0,01 Pa) na redukciu konvektívnej a konduktívnej zložky tepelného toku. Odvzdušnenie (odčerpanie) vzduchu z medzisklenného priestoru sa realizuje cez odsávací otvor prostredníctvom (turbo) molekulárneho čerpadla. Vysoké teploty turbo-molekulárneho čerpadla prerušujú spojovacie sily molekúl vzduchu a vodnej pary k povrchom, a tým vzniká účinné vákuum.

Následne je veľmi dôležité dokonalé utesnenie odsávacieho otvoru. Najoptimálnejšie je použitie špeciálneho utesnenia otvoru prostredníctvom “getteru” (getter – látka zavedená do vákuovej štrbiny na odstránenie sŕp plynu a udržanie stavu vákuua). Týmto spôsobom sa molekuly plynu zachytia. Najbežnejšie používaným materiálom používaným na getter je titan alebo platina. Takýto getter je predpokladom na udržanie konštantnej kvality vákuua na približne 50 rokov. [1]



Obr. 5: Zapuzdrený getter vo fragmente vákuového skla (Patent US 8304046)

Na udržanie správnej šírky vákuovej medzery slúžia dištančné pilieriky. Musia byť schopné prenášať tlak, ale zároveň predstavujú malé miniatúrne tepelné mosty. Ďalším výrazným tepelným mostom konštrukcie vákuového skla je okrajové tesnenie. Výrazný vplyv na tepelnú výkonnosť má aj tvar a rozstup dištančných pilierikov. Predpäté sklá umožňujú väčšie rozstupy pilierikov. Dištančný pilierik od výrobcu Synergy predstavuje najoptimálnejší tvar a materiálovú bázu pre pilierik s nízkou tepelnou vodivosťou.[3]



Obr. 6: Dištančný pilierik od výrobcu Synergy (1)

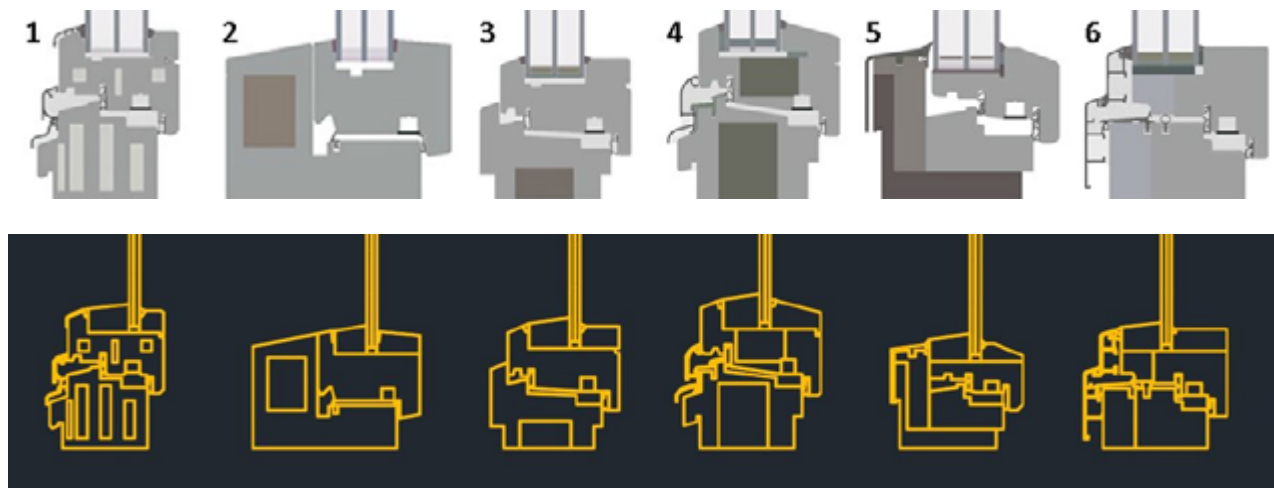
Výrazným problémom pri vákuovom skle je okrajové tesnenie s vysokou tepelnou vodivosťou. Aj keď v strede zasklenia sú taktiež malé bodové tepelné mosty reprezentované dištančnými pilierikmi, majú výrazne nižší vplyv na tepelnú výkonnosť vákuového zasklenia. Pre množstvo tepelného toku prechádzajúceho cez okrajové tesnenie vákuového skla je rozhodujúca šírka tesniaceho materiálu. Ďalším veľmi dôležitým aspektom je ako hlboko je osadené vákuové zasklenie v okennom ráme. Šírka utesňovacieho materiálu sa líši od jednotlivých výrobcov a kvality výroby (väčšinou sa jedná o šírky v rozmedzí od 12 do 15 mm). Pre utesnenie vákuových tabúľ sa môže považovať dostatočná hodnota aj 5 mm, avšak výroba takéhoto skla je technologicky náročná. Šírka utesnenia okolo 5 mm je z tepelnotechnického hľadiska najoptimálnejšia. Hlbšie osadenie vákuového zasklenia do rámu okna má za následok elimináciu nežiaducich tepelných mostov cez okrajové tesnenie. V budúcnosti bude potrebné vyvinúť vhodné technológie osadenia vákuového zasklenia do rámovej konštrukcie okna. [4]

3. Profilové riešenia súčasných drevených okien

Drevené okenné rámy ponúkajú obmedzené možnosti z hľadiska požiadaviek na tepelno-technické vlastnosti. Jednou z možností je zväčšovanie geometrických parametrov profilu. Avšak toto riešenie predstavuje neúmerné navyšovanie hmotnosti samotného rámu. Za posledných pár rokov sa europrofile z pôvodnej hrúbky 68 mm rozšírili na hrúbky 92, 102 až 110 mm. Europrofile sa vyrábajú väčšinou z troch, štyroch a viac vrstiev lamiel vzájomne zlepených vodovzdorným lepidlom. V každej lamele je prísne predpísaná orientácia letokruhov, kvôli zabezpečeniu odolnosti profilu proti skrúteniu. Za účelom dosiahnutia lepších vlastností sa môžu rôzne kombinovať. Zväčša sa jedná o zlepšenie pevnosti, ochrany dreva pred poveternostnými vplyvmi, ale aj dosiahnutie estetického hľadiska. Zo strany exteriéru sa pre zlepšenie ochrany niekedy lepí lamela z tepelne upraveného dreva, accoye resp. iných materiálov. Ďalšou možnou kombináciou je vyrobiť hranol z dvoch rôznych druhov drevín. Izolačné vlastnosti profilov sa môžu zlepšiť aj použitím vzduchových dutín. Taktiež typ dreva použitého na výrobu okenného profilu zohráva významnú úlohu na izolačné vlastnosti rámu. Mäkké drevo má lepšie tepelno-technické vlastnosti ako drevo tvrdé (mäkké drevo – ihličnaté dreviny, tvrdé drevo – listnaté dreviny). V súčasnosti ponúkané profile na materiálovej báze dreva ponúkajú rôzne konštrukčné riešenia a tvary. Väčšina profilov obsahuje účinnú tepelnú izoláciu (korok, polyuretán, aerogél, extrudovaný polystyrén – XPS, expandovaný polystyrén – EPS, purenit). Poloha izolácie je v rámci profilu rôznorodá. Môže byť pred sadením pred drevenú hmotu, súčasťou eurohranolu, resp. môže vyplňať vzduchové dutiny. Na ochranu pred poveternostnými vplyvmi osádzajú výrobcovia často z vonkajšej strany ochranný hliníkový profil. Niektoré profilové riešenia ponechávajú aj z exteriérovej strany časti priznané drevo. [5,6]

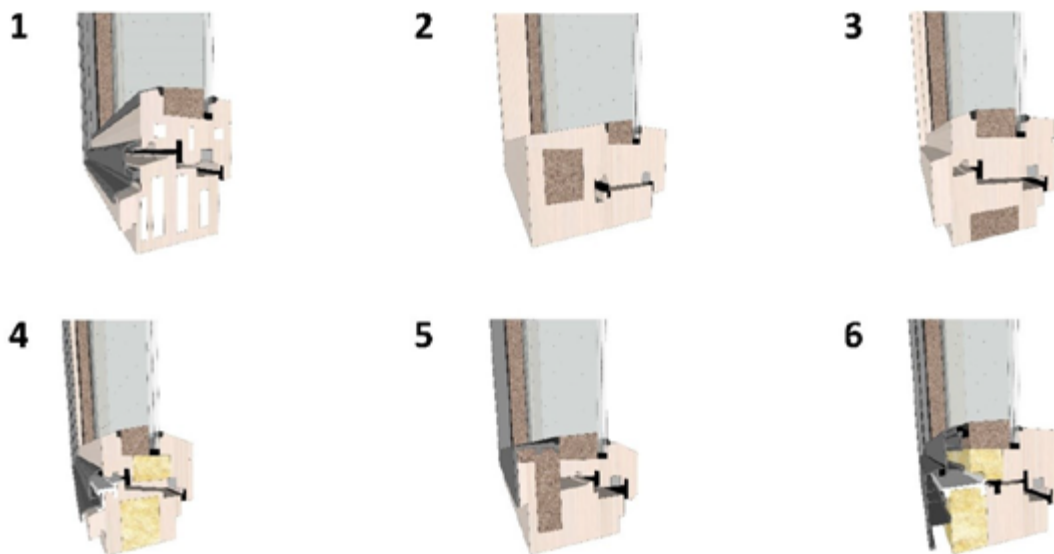
4. Simulácia

Podkladom pre simuláciu bolo 6 profilových riešení od výrobcov z Európy a Severnej Ameriky. Každý profil mal osadené izolačné trojsklo v rôznych konfiguráciách. Toto trojsklo bolo nahradené vákuovým dvojskлом v konfigurácii 5/0,2/5 mm. Usporiadanie dištančných pilierikov je v štvorcovej sieti s rozmerom oka siete 40 mm. Priemer dištančných pilierikov je 0,5 mm. Okrajové tesnenie je realizované na báze kovu – indium. Voľný priestor v zasklievacej škáre sa vyplnil korkom v spáde. Vo všetkých prípadoch sa uvažovalo s použitím jedného druhu dreveniny – smrek.



Obr. 7: Skúmané profily s izolačným trojskлом (hore), CAD podklad s osadeným vákuovým sklom (dole)

Hlavný simulačný program pre zistenie vnútorných povrchových teplôt okennej konštrukcie bol použitý program Ansys. Posudzovala sa drevená, respektíve drevo-hliníková rámová konštrukcia okna s osadeným vákuovým sklom. Posúdenie prebiehalo na 2D modely okna.



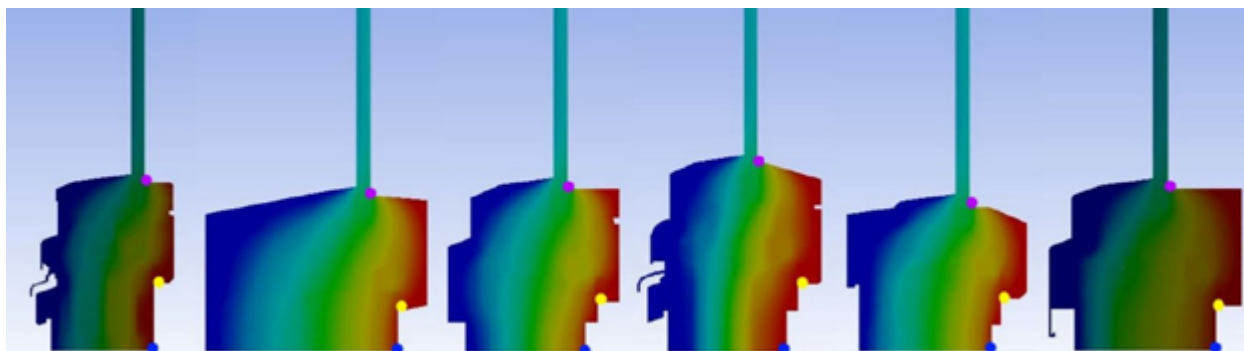
Obr. 8: Axonometrické zobrazenie skúmaných profilov

Tab. 1: Tepelno-technické vlastnosti použitých materiálov

| Materiál | Súčiniteľ tepelnej vodivosti λ [W/(m.K)] | Materiál | Súčiniteľ tepelnej vodivosti λ [W/(m.K)] |
|---------------|--|------------------|--|
| Drevo - smrek | 0,092 | Tvrdená PUR pena | 0,022 |
| Hliník | 160,000 | Sklo | 1,000 |
| EPDM | 0,250 | Indium | 83,700 |
| Oceľ | 20,000 | Aerogél | 0,013 |
| Korok | 0,050 | Polyizobutylén | 0,200 |
| Vzduch | 0,026 | Plast | 0,160 |

Metodika používania programu Ansys: príprava geometrie modelu (podklad z CAD program). Následne sa zadali vlastnosti jednotlivých materiálov - súčiniteľ tepelnej vodivosti. Nastavia sa okrajové podmienky - teplota a odpor pri prestupe tepla. Následne sa vykonalo sieťovanie, ktoré predstavuje podstatnú časť prípravy modelu na finálnu simuláciu. Čím je sieť hustejšia, tým sú výsledky presnejšie. Avšak čím je sieť podrobnejšia predlžuje sa aj celkový čas trvania simulácie.

2D teplotná simulácia bola vytvorená za pomoci nástroja Ansys Workbench. Ako metóda simulácie bola zvolená - Steady-State Thermal. Okrajové podmienky sa pridali na povrchy modelu, ktoré ohraničujú interiér – interiérové podmienky a exteriér – exteriérové podmienky. Zadávali sa ako konvekcia (Convection). Pre exteriérové podmienky platia hodnoty: $\theta_e = -11,00^\circ\text{C}$, $R_{se} = 0,04 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. Pre interiérové podmienky platia hodnoty: $\theta_i = +20,00^\circ\text{C}$, $R_{si} = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$.



Obr. 9: Teplotné polia skúmaných profilov s naznačením skúmaných teplôt – fialová (styk rámu a zasklenia), žltá (styk krídla a rámu), modrá (dolná časť rámu)

Tab. 2: Stručná charakteristika riešených profilov s výslednými povrchovými teplotami

| | Označenie okna | | | | | |
|--|--------------------|-------------------|----------------------|---------------|-----------------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Výrobca profilu | Marles PSP, d.o.o. | Menuiseries S. M. | Wescon Cedar P. Ltd. | Variotec GmbH | Slavona s.r.o. | SŁOWIŃSCY Sp J |
| Krajina pôvodu | Slovinsko | Francúzsko | Kanada | Nemecko | Česká republika | Poľsko |
| Zabudovaný izolačný materiál | aerogél | korok | korok | PUR pena | korok | PUR pena |
| Celková výška rámu | 130 mm | 110 mm | 116 mm | 108 mm | 100 mm | 112 mm |
| Celková šírka rámu | 92 mm | 156 mm | 120 mm | 100 mm | 120 mm | 116 mm |
| Šírka zasklievacej škáry | 48 mm | 40 mm | 48 mm | 34 mm | 48 mm | 48 mm |
| Hĺbka zasklievacej škáry | 22 mm | 22 mm | 23 mm | 22 mm | 21 mm | 22 mm |
| Hrúbka korkovej izolácie | 38 mm | 30 mm | 38 mm | 24 mm | 38 mm | 38 mm |
| Vnútrovná povrchová teplota [$^\circ\text{C}$] | | | | | | |
| - styk rámu a zasklenia | 2,13 | 2,11 | 1,81 | 1,49 | 1,96 | 2,14 |
| - styk krídla a rámu | 17,47 | 17,13 | 17,14 | 18,03 | 16,54 | 17,45 |
| - dolná časť rámu | 16,9 | 16,55 | 16,23 | 17,98 | 15,62 | 16,89 |

Záver

Na základe vykonaných simulácií sa zistilo, že osadenie vákuového skla v danej polohe a hĺbke je nedostatočné. Vo všetkých prípadoch v styku zasklenia a rámu vyšli približne podobné hodnoty (aritmetický priemer výsledných povrchových teplôt – 1,96 °C). Výsledky výrazne ovplyvnilo aj okrajové tesnenie vákuového zasklenia – indium, ktoré má vysoký súčiniteľ tepelnej vodivosti. Možným riešením by mohlo byť osadenie hybridného vákuového skla (izolačné dvojsklo s nahradením jednej tabule skla vákuovým). Samozrejmosťou je aj konštrukčná úprava zasklievacej drážky.

Literatúra

- [1]PONT, U., E. HEIDUK, P. SCHOBBER, et al. *Sondierung von Fenstersystemen mit innovativen Gläsern, speziell Vakuum-Isoliergläsern, zur Gebäudesanierung*. Wien: Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, 2015, 107 s.
- [2]CUCE, E., CUCE, P. M., Vacuum glazing for highly insulating windows: Recent developments and future prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 64, pp. 1345-1357 (2016)
- [3] TANG, J., PILLAR ARRANGED IN VACUUM GLAZING. Patent US 20100260950A1. Udelený 14. októbra 2010
- [4] Memon, S., Farukh, F., Eames, P. C., Silberschmidt, V. V., A new low-temperature hermetic composite edge seal for the fabrication of triple vacuum glazing, *Vacuum* 120, pp. 73-82 (2015)
- [5] PALKO, M., PALKOVÁ, A., BUDAY, P., Modern wood windows now and trends after the year 2020 (2015)
FANG, Y., ARYA, F., Evacuated glazing with tempered glass. In: *Solar Energy*. 183. 2019, 240 - 247.
- [6] AUGUSTIN, M. et al. Handbook 1: Timber structures: Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures TEMTIS. 1. Graz, 2008, 243 s.
- [7]PUŠKÁR, A., POLÁŠEK, M., Vplyv druhu dreveniny na tepelnoizolačné vlastnosti okien [online]. 2016. Dostupné z: <http://mobilab.sk/vplyv-druhu-dreveniny-na-tepelnoizolacne-vlastnosti-okien/>
- [8] [online]. Dostupné z: <https://database.passivehouse.com/en/components/list/window>

Jozef Bočkaj¹

Študijný program: Konštrukcie pozemných stavieb, ročník: 3

KALIBRÁCIA MERACIEHO ZARIADENIA MINI CTA V AERODYNAMICKOM TUNELI STU NA TRNÁVKE V BRATISLAVE

CALIBRATION BY THE MEASURING DEVICE MINI CTA IN THE AERODYNAMIC TUNNEL STU ON TRNAVKA STREET IN BRATISLAVA

Abstract

As introduction for this article is a short description of the methods and their division. They are currently used for speed quantification and for determining the direction of air flow measurements in the wind tunnel.

In the next parts is description of the basic principle on which hot-wire anemometry (HWA) or hot-film anemometry (HFA) work.

The main subject of this article is the detailed procedure for calibration by the measuring device mini CTA (Hot-wire anemometry) from the company Dantec Dynamic, which was implemented in the wind tunnel at Trnavka street in Bratislava.

1. Úvod

Od počiatku vzniku prvých aerodynamických tunelov, vznikala aj potreba kvantifikácie rýchlosti prúdenia vzduchu a taktiež aj určenie smeru prúdenia vetra okolo aerodynamických prekážok. Vývoj týchto zariadení šiel ruka v ruke s vývojom aerodynamických tunelov.

Pri meraniach v aerodynamických tuneloch sa v súčasnosti používajú meracie zariadenia a metódy, ktoré môžeme na základe ich využitia rozdeliť do dvoch základných skupín:

Metódy pre určenie rýchlosti prúdenia vzduchu:

- Anemometer zo žhaviacim drôtom (HWA) [1]
- Anemometer zo žhaviacim filmom (HFA) [2] - použitie prevažne v tekutinách
- Pulsed-wire anemometer (PWA) [3]
- Laser-Dopler anemometer (LDA) [4]
- Irwinove sondy [5, 6]

Metódy pre určenie smeru prúdenia vzduchu:

- Particle Image Velocitmetry (PIV)
- Piesková metóda [7]
- Termografická metóda [8]
- Dymová metóda [9]
- Bublínková héliová metóda [10]

¹ Jozef Bočkaj, Ing.

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, Slovensko

Jednotlivé meracie zariadenia a metódy majú svoje využitia (na základe svojich predností) a špecifiká, ktoré je pri kalibrácii zariadení a samotnom meraní potrebné dodržať.

2. Anemometre zo žhaviacim drôtom alebo filmom

Tepelné anemometre ku ktorým patria HWA sú zariadenia, ktoré majú v súčasnosti najväčšie uplatnenie pri meraniach v aerodynamických tuneloch. Týmto meracími anemometrami možno merať rýchlosti od statických rýchlostí až po veľmi prudké zmeny v rýchlostiach, v stacionárnych aj nestacionárnych prúdeniach ako aj v turbulentných prúdeniach. V turbulentných prúdeniach sa používajú na meranie premenných ako sú rýchlostné zložky, fluktuácie v rýchlostiach, stredné rýchlosti, intenzity turbulencií. Tieto tepelné anemometre možno rozdeliť do troch základných skupín: CCA (anemometer s konštantným prúdom),

CVA (anemometer s konštantným napätím),

CTA (anemometer s konštantnou teplotou).

Výstupom na týchto anemometroch sú jednotlivé veličiny za predpokladu zachovania konštantnej špecifickej premennej (prúd, napätie a teplota) podľa Ohmových zákonov.

Tento spôsob merania rýchlosti vetra využíva anemometre, ktoré sú vyhotovené z veľmi tenkého vlákna s hrúbkou 1-10 μm a dĺžkou 0,5-3 mm. Nakoľko týmto vláknom prechádza elektrický prúd je potrebné, aby mal dostatočný teplotný koeficient odporu (vlákno sa ohrieva na teplotu 300-500 K). Na základe týchto požiadaviek je vlákno vyrobené z platiny, platiny a rodia alebo platiny a irídia.

Výhodou týchto anemometrov je ich veľkosť, vysoká priestorová odozva a frekvenčná odozva (kHz).

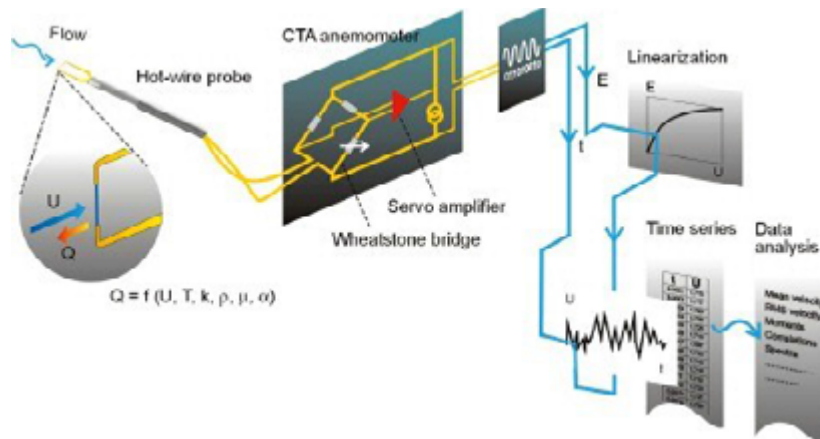
Nevýhodou týchto meracích zariadení je krehkosť tenkého vlákna, nepresnosť merania v dôsledku vplyvu trojrozmerného prúdenia vzduchu a usadzovanie prachových častíc na vlákne, čo spôsobuje nepresnosti merania [1].

3. Opis mini CTA anemometer

Mini CTA alebo anemometer so žhaviacim vláknom je meracia sonda, ktorá využíva pre stanovenie rýchlosti prúdiaceho vzduchu metódu konštantnej teploty (CTA – Constant Temperature Anemometry). Toto zariadenie umožňuje okrem merania rýchlosti, sledovať aj charakteristiky turbulentného prúdenia vďaka jeho rýchlej odozve až 100 kHz. Prenos tepla zo žhaviaceho drôtu je riešený pomocou konvekcie Q , ktorá je funkciou rýchlosti prúdenia U , rozdielom teploty na drôte ($T_w - T_0$), okolia a vlastnosti prúdenia vzduchu. Základný vzťah medzi prenosom tepla a rýchlosti pre vlákno umiestnené kolmo na prúd vzduchu je známy ako L. V. Kingov ochladzovací zákon, ktorý je popísaný rovnicou:

$$Q = (T_w - T_0)A_w h = A + BU^n; n \approx 0,5, \quad (1)$$

kde A_w je plocha drôtu (priemet) v rovine kolmej na smer prúdenia, h je koeficient prenosu tepla a A, B sú kalibračné konštanty. Schematicky je princíp meracieho zariadenia znázornený na obrázku (Obr. 1).



Obr. 1 Schematické znázornenie princípu merania pomocou anemometra so žeraviacim vláknom [www.dantecdynamic.com]

Odpor žhaviaceho vlákna anemometra je závislý na jeho teplote a je spojený pomocou Wheatstonovho mostíku, tento mostík je zohrievaný na výrazne vyššiu pracovnú teplotu ako teplota okolitého prúdiaceho vzduchu. Tento prúdiaci vzduch ochladzuje drôt a to spôsobuje zvýšenie napätia prechádzajúceho drôtom čo zapríčiňuje zvýšenie teploty na Wheatstonom mostíku na základe impulzu z CTA modulu. Výstupom z modulu CTA je signál úmerný množstvu napätia, ktoré je potrebné na vyrovnanie teploty na Wheatstonovom mostíku. Preto je závislosť medzi rýchlosťou a napätím na Wheatstonovom mostíku možné opísať exponenciálne alebo polynómom pomocou vzťahov:

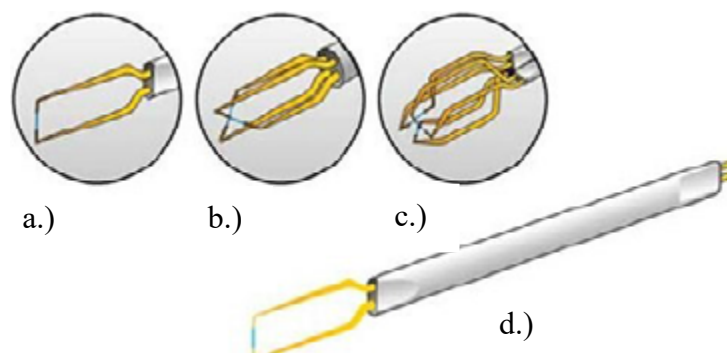
$$E^2 = (T_w - T_0)(A + BU^{0.5}), \quad (2)$$

$$U = C_0 + C_1E + C_2E^2 + C_3E^3 + C_4E^4 + C_5E^5. \quad (3)$$

Pri kalibrácii CTA anemometra získame kalibračnú krivku, ktorá je závislá od napätia na mostíku a rýchlosti prúdiaceho vzduchu. Následne na základe tejto závislosti dostaneme konštanty A , B alebo C_n , vďaka ktorým môžeme zo signálu napätia získať signál rýchlosti.

Meracie zariadenie so žhaviacim drôtom je vhodné kalibrovať pred každým meraním z dôvodu jemnosti vlákna, ktoré je náchylné na usadzovanie nečistôt (prachu), ktoré sa nachádzajú v pracovnej časti tunela [11].

Na základe požiadaviek merania rýchlosti prúdenia vzduchu v rovinách x , y a z možno tieto anemometre rozdeliť na jednoduché, dvojité a trojité (Obr. 2).



Obr. 2 Znázornenie troch druhov anemometrov so žeraviacim vláknom, a.) jednoduché, b.) dvojité, c.) trojité, d.) pohľad na jednoduchý anemometer [www.dantecdynamic.com]

4. Referenčná Prandtlova sonda

Najbežnejším meracím zariadením vo veterných tuneloch je Pitotova trubica (meria celkový tlak) alebo častejšie Prandtlova trubica (meria okrem celkového aj statický tlak), nazývaná tiež Pitot-statická alebo Pitotova trubica Prandtlovho typu. Stanovuje hodnotu rýchlosti vetra metódou rozdielu tlakov na povrchu dvoch odberných miest oceľovej trubičky. Celkový tlak je získaný z Pitotovej trubice, statický tlak cez statický port, ktorý je zvyčajne tvorený dierami na opláštení trubice (Obr. 3). V aerodynamickom tuneli na ktorom bola riešená kalibrácia meracieho zariadenia využíva ako referenčnú sondu práve Prandtlovu trubicu.



Obr. 3 Prandtlova trubica a schéma rozdielov medzi Pitotovou a Prandtlovou sondou [www.wikipedia.com]

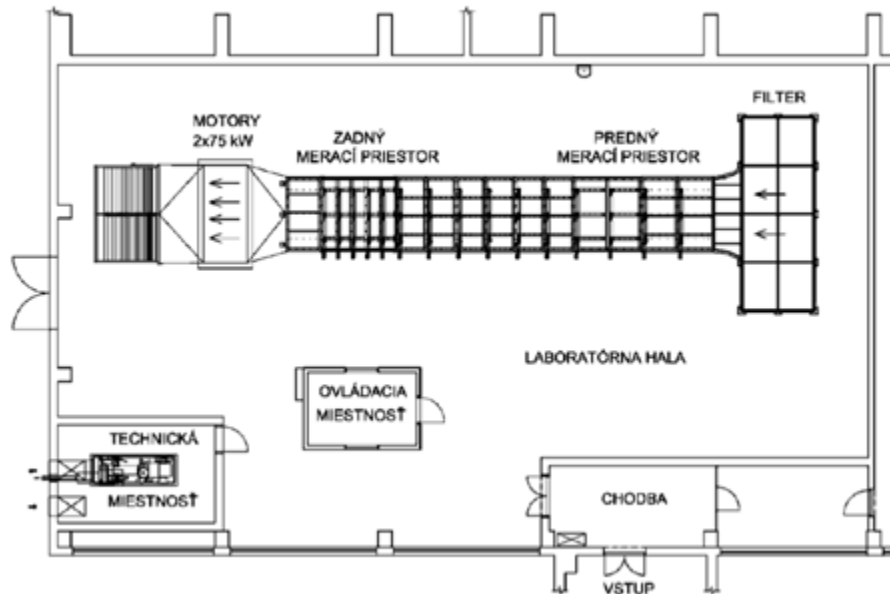
5. Aerodynamický tunel STU na Trnávke v Bratislave

Kalibrácia meracieho zariadenia mini CTA bolo realizované v aerodynamickom tuneli na Trnávke v Bratislave.

Jedná sa o aerodynamický tunel s otvoreným meracím okruhom, ktorého prierez je 2,6 x 1,6 m s celkovou dĺžkou 26,5 m. Tunel je rozdelený na dve meracie časti (predný merací priestor a zadný merací priestor). Predný merací priestor slúži na meranie ustáleného prúdenia (turbulencia do 5 %) a zadný pre turbulentné prúdenie s pracovnou časťou v ktorej je tvorený turbulentný veterný profil pomocou drsnej spodnej časti aerodynamického tunela.

Predný merací priestor umožňuje experimentálne merania v rovnomernom ustálenom prúdení vzduchu s rýchlosťou do 24 m/s.

Predný merací priestor je určený pre skúmanie prúdenia vzduchu okolo štíhlych modelov a ich častí (ako napríklad: mosty, veže, stožiare a podobne). V tomto priestore sa realizuje aj kalibrácia meracích zariadení anemometrov.



Obr. 4 Pôdorys laboratórnej haly pracoviska STUBA v Trnávke [12]

Pôdorys laboratórnej haly v ktorej sa nachádza aerodynamický tunel (Obr. 4). Prúdenie vzduchu zabezpečujú dva asynchrónne poháňané motory, ktorých priemer je 1,6 m a výkon každého ventilátora je 75 kW s napojením na frekvenčný menič pri otáčkach max 100 ot./min.

Ventilátory dodávajú prietokový objem vzduchu viac ako 100 m³/s s rýchlosťou prúdenia od 0,2 do 24 m/s (86, 4 km/h). Tunel je ovládaný pomocou počítača umiestneného v ovládacej miestnosti v ktorom sa nachádza počítačový softvér LabView (National Instruments). Rýchlosti prúdiaceho vzduchu v danom (meranom) bode v tuneli zadefinujeme pomocou programu ovládania tunela, kde zadávame frekvenciu meničov motorov. V meracej kabíne sa nachádza ďalší počítač, ktorým monitorujeme potrebné parametre tunela (rozloženie pozdĺžnych tlakov) a iné potrebné parametre (teplota a atmosférický tlak v hale) [12].

6. Kalibrácia meracieho zariadenia mini CTA anemometra

Okrajové podmienky pri kalibrácií

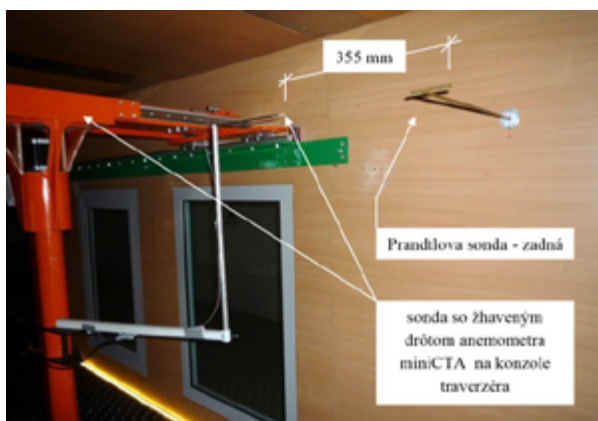
Počas kalibrácie anemometra bola teplota okolo 15 °C a barometrický tlak približne 101 900 Pa. Pre vývin turbulentného prúdenia bola použitá bariéra s výškou 150 mm a drsnosť podlahy tunela bola vytvorená pomocou profilovanej fólie s výškou profilu 20 mm, kde táto drsnosť na základe STN EN 19911-4 zodpovedá kategórií terénu medzi III. (predmestie) a kategóriou terénu IV. (centrum mesta).

Kalibrácia meracieho zariadenia

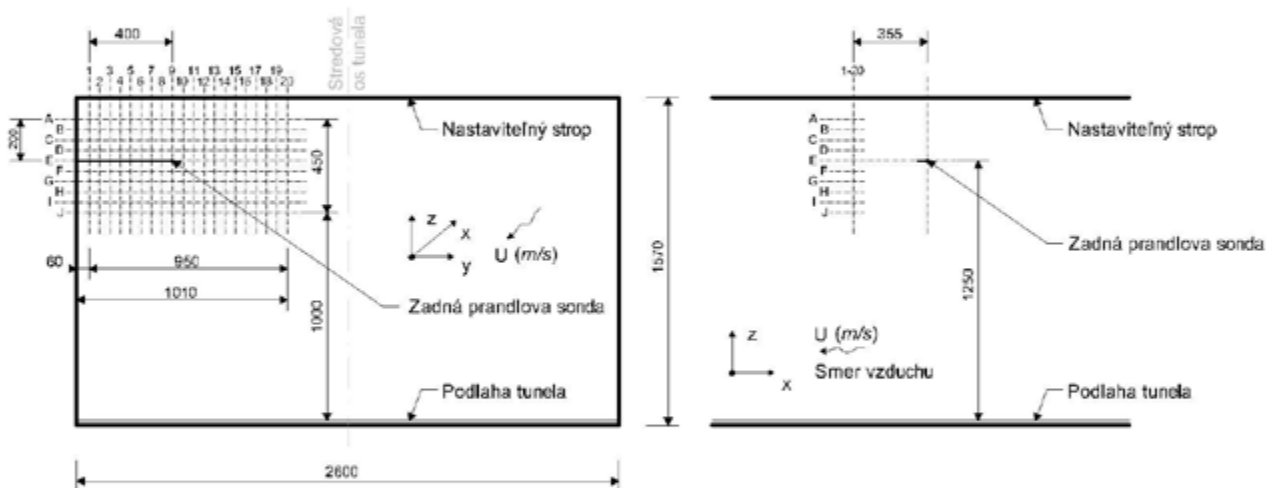
Pri kalibrácií meracieho zariadenia mini CTA sa porovnáva nameraná rýchlosť s rýchlosťou na referenčnej (Prandlovej sonde), ktorá je pevne uchytená na stene aerodynamického tunela v súradniciach: $y = 460$ mm od steny a $z = 1250$ mm od podlahy tunela (Obr. 5).

Kalibráciu je potrebné realizovať v čo najväčšej blízkosti hlavnej referenčnej sondy a zároveň je potrebné zabezpečiť, aby počas kalibrácie boli obe meracie sondy vystavené rovnakým veterným podmienkam.

Pri kalibrácii bol anemometer mini CTA upevnený na pohyblivom rameno traverzéra (Obr. 5), ktorý sa dokáže pohybovať v osiach x , y a z . Toto meracie zariadenie sa pri kalibrácii pohybovalo v rasti meracích bodov, ktorý je znázornený na obrázku (Obr. 6) s krokom 50 mm v smere osi y a z pre nameranie stredných rýchlostí vetra.



Obr. 5 Fotografia z kalibrácie anemometra – pozícia Prandtlovej sondy a mini CTA



Obr. 6 Rozmiestnenie bodov v ktorých bola meraná stredná rýchlosť vetra

Na ovládanie tunela a zaznamenávanie jednotlivých dát z meraní je v aerodynamickom tuneli používaný program LabView (National Instruments). Je dôležité spomenúť, že pre nastavenie požadovanej rýchlosti prúdiaceho vzduchu v danom (meranom) bode v tuneli je nutné do programu ovládania tunela zadať frekvenciu meničov motorov. Rýchlosť prúdiaceho vzduchu sa totiž neustále mení vzhľadom na závislosť hustoty vzduchu, ktorá je funkciou aktuálnej teploty a barometrického tlaku. Z toho vyplýva, že sa nedá presne priradiť k určitej hodnote frekvencií meničov motorov stála hodnota rýchlosti prúdiaceho vzduchu. Hodnotu prúdiaceho vzduchu je teda nutné určiť meraním podľa aktuálnych teplotných a tlakových podmienok a tým určiť aj zodpovedajúce frekvencie meničov motorov.

Prvým krokom pri kalibrácii meracieho zariadenia bolo nameranie stredných rýchlostí v osi kalibrácie pomocou Anemometra mini CTA. Táto os kalibrácie bola stanovená pred zadným meracím priestorom, ale zároveň v čo najbližšej možnej blízkosti k referenčnej (Prandtlovej) sonde.

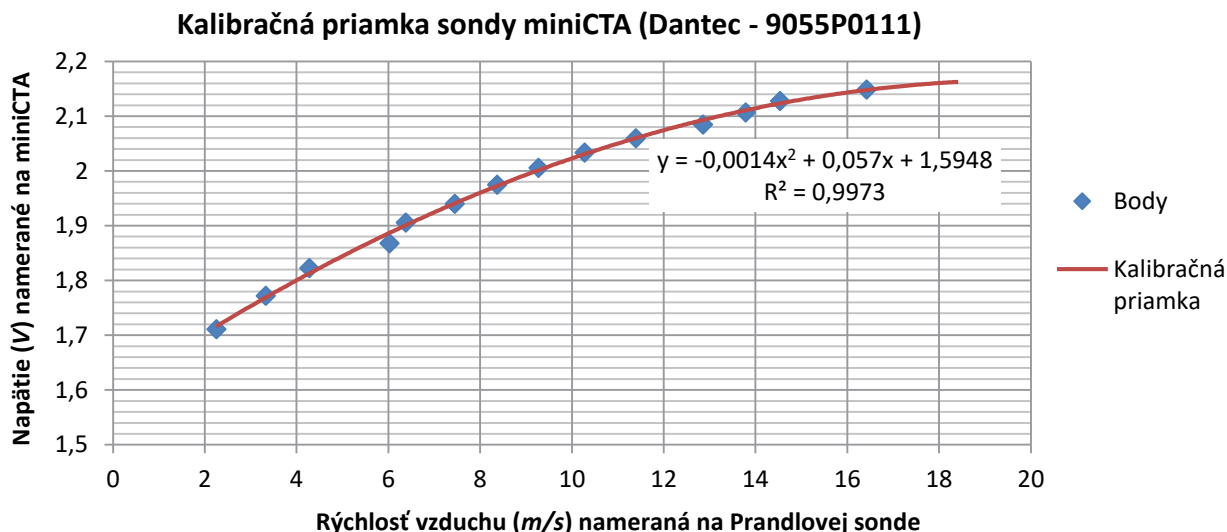
V našom prípade bola vzdialenosť osi kalibrácie závislá od maximálneho dojazdu traverzéra a dĺžky vodorovnej konzoly, na ktorej bol umiestnený anemometer mini CTA. Preto bola vzdialenosť osi kalibrácie od referenčnej (Prandtlovej) sondy 355 mm v smere prúdenia vzduchu (teda v osi x). Ako je možné vidieť na obrázku (Obr. 5, 6), sieť stredných rýchlostí experimentu bola tvorená mriežkou s rastrom bodov s krokom každých 50 mm. Rozsah siete bol vo vodorovnom smere (prične na smer prúdenia vzduchu) $y = 60 - 1\,010$ mm od steny tunela a v zvislej osi $z = 1\,000 - 1\,450$ mm od podlahy tunela. Merania sa uskutočnili pri troch rýchlostiach: 3,7 m/s (frekvencia meničov $f = 8$ Hz); 9,3 m/s ($f = 18$ Hz) a 14,0 m/s ($f = 26$ Hz). Vzorkovacia frekvencia merania s mini CTA bola 3000 Hz s počtom vzoriek 90 000, čo predstavuje dĺžku merania $T = 30$ s na každý bod [12].

Vyhodnotenie kalibrácia meracieho zariadenia

Počítačový software LabView na základe nameraných údajov rýchlosti na Prandtlovej sonde a napätia na mini CTA vytvorí rovnicu krivky, ktorú môžeme vidieť na obrázku (Obr. 7) automaticky. V našom prípade bol graf spracovaný na základe nameraných údajov, ktoré sme získali z počítačového programu.

Tab. 1 Tabuľka nameraných hodnôt

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Napätie (V) | 1,711 | 1,772 | 1,823 | 1,868 | 1,906 | 1,940 | 1,975 | 2,006 | 2,034 | 2,060 | 2,085 | 2,107 | 2,128 | 2,149 |
| Rýchlosť (m/s) | 2,248 | 3,328 | 4,273 | 6,024 | 6,374 | 7,444 | 8,367 | 9,265 | 10,273 | 11,388 | 12,855 | 13,786 | 14,531 | 16,417 |



Obr. 7 Namerané hodnoty spracované v grafe s kalibračnou rovnicou

Na základe kalibračnej krivky (kalibračnej rovnice) je možné určiť rýchlosť prúdiaceho vzduchu (m/s) v ktoromkoľvek bode aerodynamického tunela pri obtekaní vzduchu okolo prekážok na základe nameraných hodnôt napätia na mini CTA.

7. Záver

Toto zariadenie sa v súčasnosti vo veľkej miere využíva v aerodynamických tuneloch pre meranie rýchlosti prúdia vzduchu. Hlavným dôvodom je rýchlosť merania, rýchlosť kalibrácie meracieho zariadenia, spracovania samotných dát a bezpochybne cena.

Pri kalibrácii samotného zariadenia bolo prúdenie vzduchu v aerodynamickom tuneli ovplyvnené stenou tunela, na ktorom je umiestnená Prandtlova sonda. Tento negatívny vplyv bol spôsobný povrchovým trením vzduchu o stenu aerodynamického tunela. Avšak na konečný výsledok tento jav nemal výrazný vplyv v dôsledku nameraných rovnakých hodnôt rýchlosti vzduchu v kalibračnom bode, kde boli namerané rovnaké rýchlosti prúdenia vzduchu na Prandtlovej sonde a mini CTA.

PodĎakovanie

Tento článok vznikol za podpory Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky v rámci výskumu a vývoja Operačný program pre projekt "University Science Park of STU v Bratislave", ITMS 26240220084, spolufinancovaný z prostriedkov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

- [1] Benjamin, S.R., et. al., *Measuring flow velocity at elevated temperature with a hot wire anemometer calibrated in cold flow*, International Journal of Heat and Mass Transfer 45 (2002): p. 703-706
- [2] Bruun, H. H., *Hot-film anemometry in liquid flows*, Measurement Science and Technology 7 (1996): p. 1301-1312
- [3] Burst, R., et. al., *The development of a pulsed-wire probe for measuring flow velocity with a wide band width*, International Journal of Heat and Fluid Flow 24 (2003): p. 1-13
- [4] Blockenat, B., et. al., *Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment*, Building and Environment 100 (2016): p. 50-81
- [5] H.P.A.H. Irwin, *A simple omnidirectional sensor for wind-tunnel studies of pedestrian-level winds*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 7 (3) (1981): p. 219-239
- [6] Wu, H., et. al., *Further experiments on Irwin's surface wind sensor*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 53 (3) (1994): p. 441-452
- [7] Livesey, F., et. al., *A scour technique for the evaluation of pedestrian wind*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 36 (2) (1990): p. 779-789
- [8] Sasaki R. et. al., *Application of infrared thermography and a knowledge-based system to the evaluation of the pedestrian-level wind environment around buildings*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67&68 (1997): p. 873-883
- [9] Sharul Sham Dol, et. al., *An Improved Smoke-Wire Flow Visualization Technique*, Proceeding of the 4th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics and Aerodynamics, Elouda, Greece (2006): p. 231-236
- [10] Tuinstra D. et. al., *Helium-filled soap bubbles tracing fidelity in wall-bounded turbulence*, Experiments in Fluids 59:56 (2018): p. 1-13
- [11] Zacho, D., 2011, *Aplikace mericich metod pro BLWT – STU Bratislava*, Praha: VZLÚ a.s., s. 24
- [12] Lobotka, P., 2014, *Modelovanie prirodzeného vetra a jeho kvantifikácia vo veternom tuneli*, Slovenská Technická Univerzita – Stavebná fakulta, Dizertačná práca

Samuel Cruz

D-TKPS4 teória a konštrukcie pozemných stavieb, 3. ročník

MODELOVANIE POVRCHOVEJ DRSNOSTI OBALOVÉHO PLÁŠŤA BUDOV V CFD SIMULÁCIACH A VETERNOM TUNELI

MODELING OF SURFACE ROUGHNESS OF THE BUILDINGS IN CFD AND WIND TUNEL

Abstract

Urban physics is the science and engineering of physical processes in urban areas. It basically refers to the transfer of heat and mass in the outdoor and indoor urban environment, and its interaction with humans, fauna, flora and materials. Urban physics is a rapidly increasing focus area as it is key to understanding and addressing the grand societal challenges climate change, energy, health, security, transport and aging. The main assessment tools in urban physics are field measurements, full-scale and reduced-scale laboratory measurements and numerical simulation methods including Computational Fluid Dynamics (CFD). In the past 50 years, CFD has undergone a successful transition from an emerging field into an increasingly established field in urban physics research, practice and design.

1 Úvod a teória

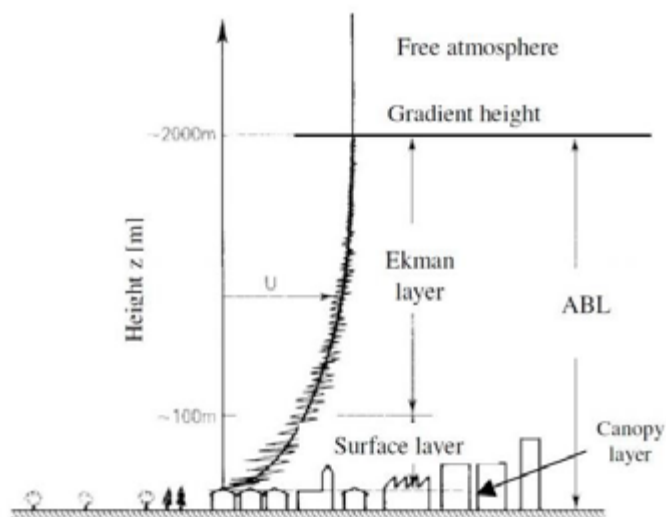
Odvetvie veterného inžinierstva je v dnešnom zastavanom svete veľmi dôležité. Veterné inžinierstvo môžeme nájsť v mnohých odvetviach napr. v mechanike, statike, meteorológii a v mnohých ďalších. Aplikovaním fyzikálnych zákonov analyzujeme vplyv vetra v prírodnom a zastavanom prostredí a študujeme možné poškodenie, nepohodlie, alebo benefity, ktoré môžu vzniknúť vplyvom vetra. Odvetvie veterného inžinierstva zahŕňa silné vetry, ktoré môžu spôsobovať nepohodlie, ako aj extrémne vetry ako tornádo, hurikán, alebo silná búrka, ktoré môžu spôsobiť rozsiahle poškodenia. Veterné inžinierstvo čerpá z meteorológie, dynamiky kvapalín, mechaniky a z veľkého množstva špecializovaných inžinierstiev ako aerodynamika a dynamika konštrukcii. Používa nástroje, ako atmosférické modely, veterné tunely, výpočtovú dynamiku kvapalín (CFD - Computational fluid dynamics). CFD je odvetvie mechaniky kvapalín, ktorá používa numerickú analýzu a dátové štruktúry na vyriešenie a analyzovanie problémov, ktoré zahŕňajú prúdenie kvapalín. Výpočty sú vykonané na počítači a vyžadujú simuláciu interakcie kvapalín a plynov s povrchom definovaným okrajovými podmienkami. Výsledky, ktoré dostaneme je potrebné porovnať s reálnymi nameranými údajmi, aby sme zistili akej chyby sme sa dopustili. Simulácie sú vlastne numerické modely, ktoré sa riadia presne definovanými rovnicami. Pri numerickom riešení sú vo všeobecnosti skoro všetky CFD problémy definované Navier-Stokes rovnicami. Navier-Stokesové rovnice sú najvšeobecnejšie riadiace rovnice prúdenia kvapalín a ich riešenie je veľmi zložitá [2].

1.1 Atmosférická hraničná vrstva a jej simulácia

Atmosférická hraničná vrstva (ABL – Atmospheric boundary layer) je najnižšia časť atmosféry. Pre lepšie pochopenie sa ju snažíme modelovať rôznymi spôsobmi. V modernej dobe je najčastejším priblížením sa k pochopeniu hraničnej vrstvy práve počítačová simulácia. Vďaka simulácii vieme aproximovať celú hraničnú vrstvu a jej správanie.

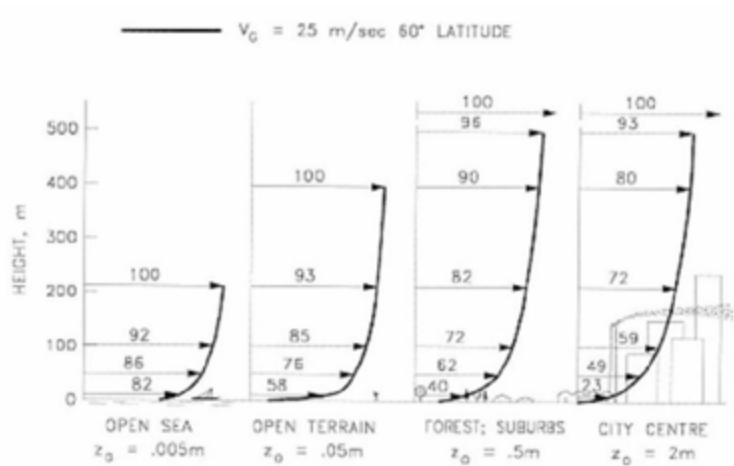
1.2 Simulácia ABL

Prirodzená ABL, kde prestup tepla zanedbávame, môže byť rozdelená do niekoľkých podvrstiev, ako sú popísané na obrázku 1.



Obr. 1: Rozdelenie ABL na podvrstvy [2].

Na povrchovú vrstvu, ktorá sa nachádza tesne nad zemským povrchom, kde prekážky pozostávajú z drsných elementov a na povrchovú vrstvu, kde je efekt Coriolisových síl (zjednodušene povedané, sila rozdielov tlakov sa vyrovná odstredivej sile prúdenia vzduchu) stále zanedbateľný. Nad povrchová vrstva ABL, alebo Ekmanová vrstva je na rozdiel od povrchovej vrstvy priamo ovplyvnená rotáciou zeme, ktorej zdrojom sú Coriolisové sily [3]. Drsnosť terénu priamo ovplyvňuje výšku hraničnej vrstvy, ako môžeme vidieť na obrázku 2., čím drsnejší terén, tým vyššia je hraničná vrstva.



Obr. 2: Rozdielne rýchlostné profily v závislosti od topológie terénu [3].

1.3 Modelovanie turbulencie

Pri modelovaní turbulencií vstupuje do hry viacero faktorov. Jednak je to zvolený turbulentný model (počet rovníc ktoré uzatvárajú systém diferenciálnych rovníc), ako aj samotný prístup k výpočtu. Keď sa snažíme namodelovať turbulencie v okolí nejakej budovy je potrebné vedieť, čo sa odohráva v tesnej blízkosti stien. Táto oblasť je z hľadiska výpočtu veľmi dôležitá a preto existuje niekoľko prístupov ako pri výpočte postupovať. Hlavným parametrom, ktorým sa budeme zaoberať je **drsnosť**. V aerodynamike je dôležité si uvedomiť, že existuje viacero typov drsnosti. My sa zaoberáme predovšetkým povrchovou drsnosťou, ktorá bude priamo ovplyvňovať vývoj turbulencií.

1.4 Povrchová drsnosť v aerodynamike

Povrchová drsnosť sa konkrétne vo výpočtovom softvéri ANSYS FLUENT zadáva ako konštanta, ktorá aproximuje geometrickú drsnosť:

$$k_{s,ABL} = \frac{9.793 z_0}{C_s}, \quad (3)$$

kde z_0 je aerodynamická dĺžka drsnosti a $k_{s,ABL}$ povrchová drsnosť

2 Numerická časť

2.1 Všeobecné nastavenia a modelovanie prúdenia vetra vo veternom tuneli

Budeme simulovať hraničnú vrstvu vo veternom tuneli. Vo veternom tuneli je nástup hraničnej vrstvy dosiahnutý zdrsnením spodnej steny tunela a vznikom turbulencie vid'. Obr. 3.



Obr. 3: Zdrsnenie spodnej steny veterného tunela STU pomocou nopovej fólie. Takto zdrsnený povrch radí hraničnú vrstvu, ktorá vznikne do kategórie 3-4.

Vertikálny profil kinetickej energie turbulencie a rýchlosť rozptýlenia vetra boli vypočítané použitím trecích síl, ktoré zahŕňajú drsnosť terénu a rýchlosť vetra v danej výške. Okrajová podmienka pre vstup bola nastavená ako logaritmický profil použitím používateľom definovanými funkciami (UDF), kde rovnica (4) predstavuje rýchlosť vetra v smere osi x, rovnica (5) popisuje výpočet turbulentnej kinetickej energie a rovnica (6) je rýchlosť rozptýlenia. Logaritmický profil bol zadefinovaný ako vstupný parameter pre vstup ako:

$$\frac{U}{u^*} = \frac{1}{K} \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right), \quad (4)$$

kde u^* je rýchlosť trenia, K je Von Karmanová konštanta a z_0 je parameter veľkosť drsnosti povrchu.

$$k = \frac{(u^*)^2}{\sqrt{C_\mu}}, \quad (5)$$

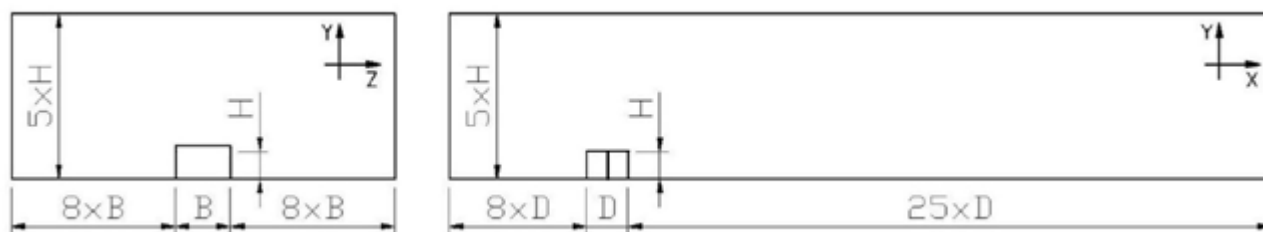
$$\epsilon = \frac{(u^*)^3}{\kappa(z+z_0)}. \quad (6)$$

2.2 Okrajové podmienky

Spodná stena (povrch) bola nastavená ako stena so štandardnou stenovou funkciou, vrchná a bočné steny boli nastavené ako symetria, stena cez ktorú prúdenie vteká bola nastavená podľa logaritmického ABL profilu. Drsnosť spodnej steny (povrchu) bola nastavená na 0.02 m, táto drsnosť zodpovedá ABL profilu pre povrch s nízkou zástavbou (mesto).

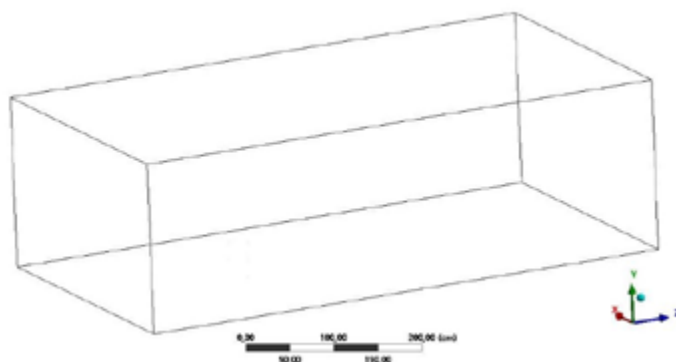
2.3 Veľkosť oblasti

Koeficienty tlaku a rýchlostné polia sú citlivé na veľkosť oblasti. Celkové rozmery výpočtovej oblasti boli nastavené ako 8x šírka budovy na obe strany od budovy, dĺžka bola nastavená ako 8x dĺžka budovy pred budovou a 25x dĺžka budovy za budovou a výška bola nastavená ako 5x výška budovy vid' obrázok Obr. 4.. Oblasť takejto veľkosti nám zabezpečuje to, že okrajové podmienky (symetria a výtok) majú na rýchlostný profil minimálny efekt.

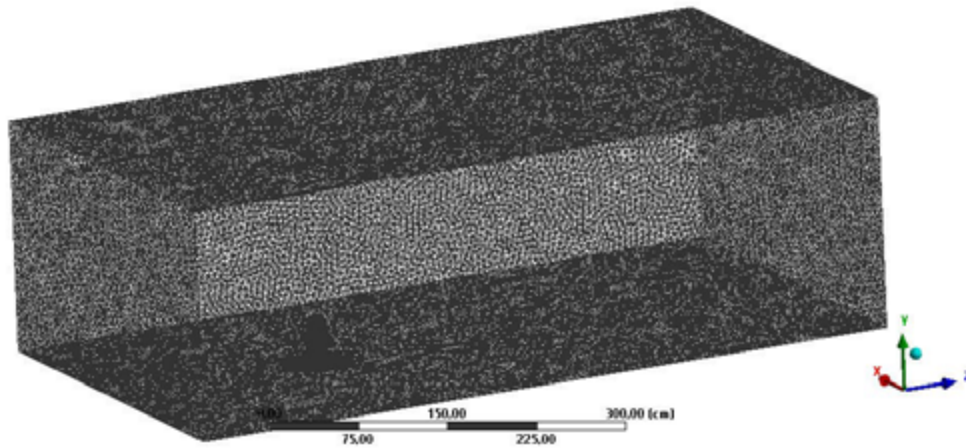


Obr. 4: Veľkosť výpočtovej oblasti [5].

Samotný experiment pozostával z dvoch častí. Prvou bolo nasimulovanie oblasti bez objektu a porovnať získané údaje s reálne nameranými hodnotami z aerodynamického tunela a vyladiť parametre výpočtu tak, aby sme dosiahli čo najmenšiu chybu. Druhou časťou bolo vložiť do takto nastaveného tunela objekt ktorý chceme skúmať. Na simuláciu sme použili MKP výpočtový softvér Ansys a jeho súčasť fluent. Samotné výpočty boli vykonané na klastry hpc Stavebnej fakulty pod systémom linux. Pred samotným výpočtom bolo potrebné vytvoriť fluent script, ktorý bude pod linuxom pracovať automaticky od spustenia samotného fluentu cez nastavenie modelu a stenových funkcií, až po uloženie výstupných dát, ktoré sme následne vizualizovali prostredníctvom Ansysu. Kým sme vytvorili obstojný model, prešli sme nespočetné množstvo simulácií, ktoré viedli k zlým výsledkom. Ako sme písali v časti veľkosť oblasti, samotný výpočet je na veľkosť siete veľmi citlivý. Preto je ťažké nájsť optimálny mesh pre výpočtovú oblasť. Samotné sieťovanie oblasti bolo nastavené, tak že elementy mohli mať maximálnu veľkosť 5.53 cm a pri samotnom výpočte sme museli nastaviť ďalšie parametre, ktoré výpočet ovplyvňujú tak, aby sme dostali čo najlepšie výsledky.



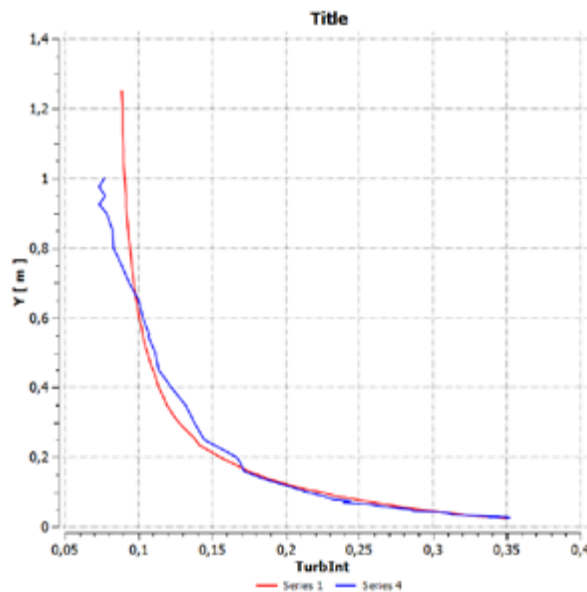
Obr. 5: Výpočtová oblasť.



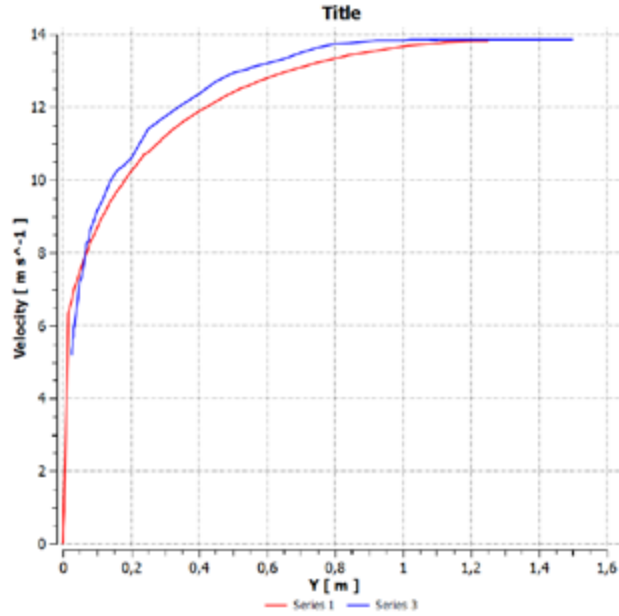
Obr. 6: Mesh výpočtovej oblasti.

2.4 Dosiiahnuté výsledky

Vypočítané hodnoty rýchlosti a turbulencie sme porovnali s reálne nameranými hodnotami a ich porovnanie je znázornené na obrázku Obr. 5. a Obr. 6.

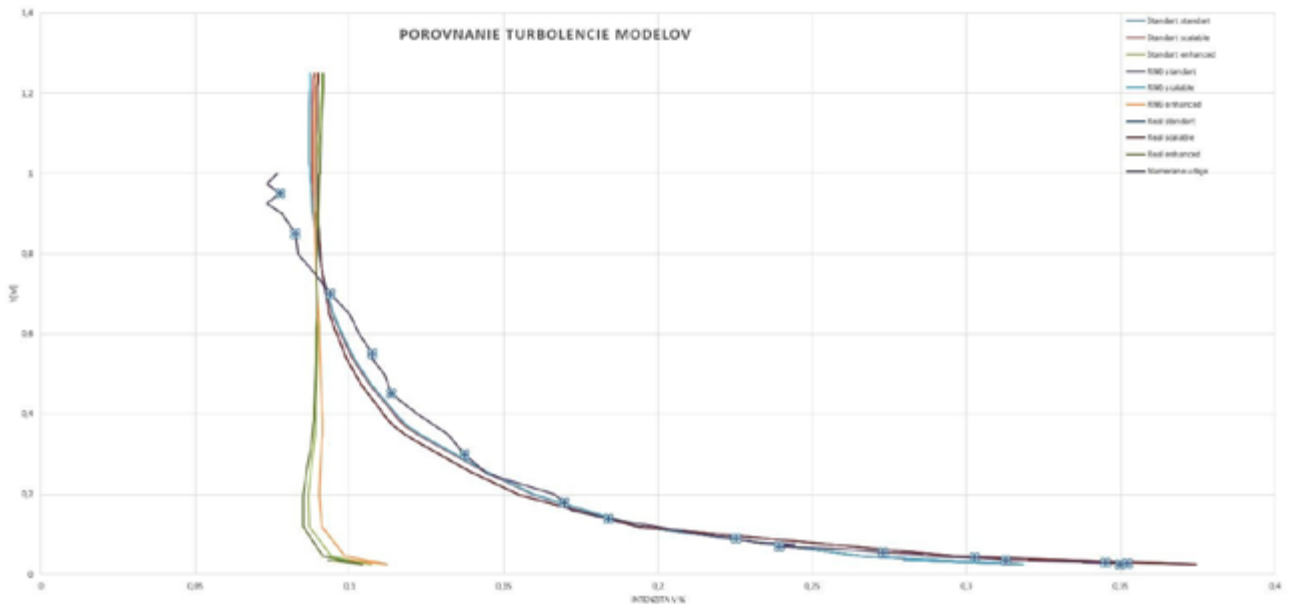


Obr. 7: Porovnanie hodnôt turbulencie modelu K- ϵ - Standard. Modrá-namerané hodnoty, červená-vypočítané.



Obr. 8: Porovnanie hodnôt turbulencie modelu K-ε - Standard. Modrá-namerané hodnoty, červená-vypočítané.

Na obrázku Obr. 7 je znázornené porovnanie samotných výpočtových modelov (Standard, RNG, Realizable a ich stenových funkcií) a ich turbulencií.



Obr. 8: Porovnanie hodnôt turbulencií samotných modelov.

3 Záver

Pri správnom nastavení počítačovej simulácie vieme pomerne presne aproximovať hraničnú vrstvu v aerodynamickom tuneli. Výpočtový softvér Fluent ponúka možnosť softvérovej drsnosti a tá značne odľahčuje nároky na výpočtové zdroje. Porovnaním hodnôt simulácie a hodnôt reálne

nameranými vo veternom tuneli sme zistili, že takto nastavená drsnosť povrchu má značný vplyv na výsledok a práve preto si myslíme, že takouto aplikáciou drsnosti na steny budovy by sme mohli znížiť zaťaženie výpočtových zdrojov s dosiahnuť rovnako presné výsledky.

Literatúra

- [1] <https://en.wikipedia.org/wiki/Windengineering>
- [2] CRASTO, Giorgio. Numerical simulation of the Atmospheric Boundary Layer, 2007.
- [3] ANSYS. FEM program. Theory manual V.17.2, 2017. zv. 2017.
- [4] E. ACHENBACH, E. HEINECKE. On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of Reynolds numbers 6×10^3 to 5×10^6 . Journal of Fluid Mechanics
- [5] KRALIK, J. 3-D CFD Simulation of the Airflow over a Gable Roof with Different Elevations, 2015

Mário Chlaň¹

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník prvý.

VYUŽITIE BIM PRI ŽIVOTNOM CYKLE BUDOVY

USING BIM IN LIFE CYCLES OF THE BUILDING

Abstract

Building information modeling is an intelligent process for creating and managing projects. It greatly facilitates work in the design of the building as well as in the other phases of its life cycle. The project phase is about facilitating the flow of information between the different professions involved in the projection. Bim helps you work with projects faster, more economically and with less impact on the environment.

Kľúčové slová

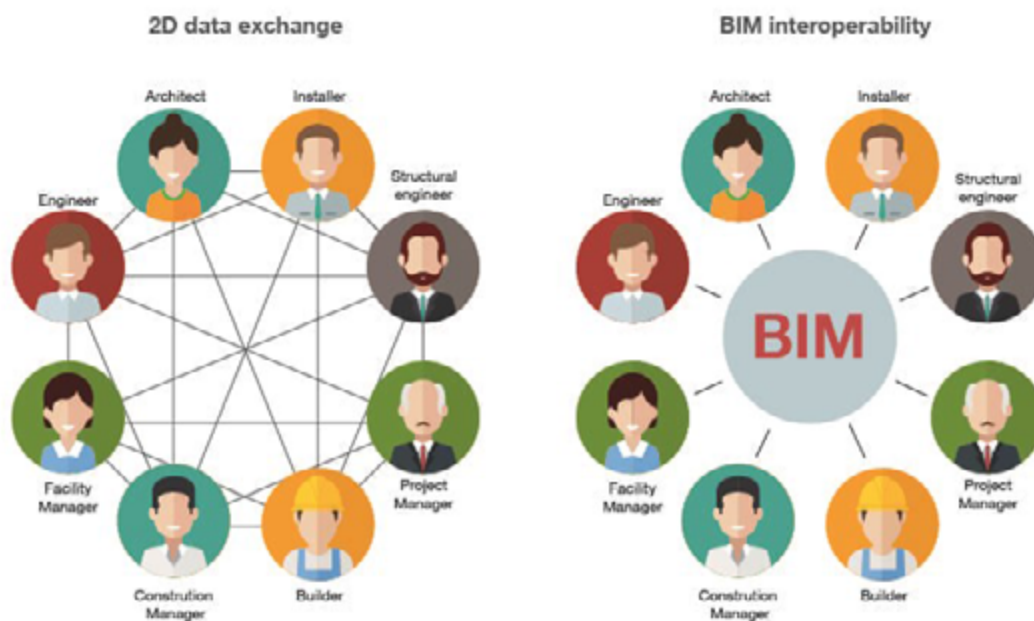
BIM, správa budovy, digitálne dvojča, bim projektovanie, simulácie

1. Úvod

Skratka anglických slov Building Information Modeling hovorí o informačnom modeli budovy. V našej krajine zatiaľ neexistuje presná definícia významu skratky BIM. Jedná sa o knižnicu (databázu) ktorá môže byť prezentovaná ako digitálne dvojča objektu pozemných stavieb. Databáza je teda naplnená množstvom grafických a negrafických informácií o danej stavbe. Zloženie databázy môže byť rôzne, záleží k akému účelu má model slúžiť. V základe ale obsahuje informácie o stavebných konštrukciách, nosných a nenosných prvkoch a ich materiálových charakteristikách. Cieľom je vytvorenie databázy s úplnými, spoľahlivými a ľahko dostupnými informáciami. Oproti doterajšiemu projektovaniu nastáva zmena hlavne v komunikácii a výmene dát, ktorá prebieha na jednom mieste v konkrétnom digitálnom modeli. Akákoľvek informácia vie byť kontrolovaná nakoľko všetci zúčastnení pri projekcii čerpajú informácie z jedného spoločného zdroju - BIM modelu.

Informačný model budovu sprevádza počas celého životného cyklu budovy, čo znamená od jej projekcie, počas jej využívania, až po zánik (demoláciu). V podstate ide o prvotnú-projekčnú fázu budovy, aktualizáciu modelu podľa skutočného vyhotovenia a následné použitie BIM pre simulácie budovy pri konkrétnych situáciách a hlavne využitie pri správe budovy.

¹ Ing. Mário Chlaň, Katedra konštrukcií pozemných stavieb, Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Radlinského 11, 810 05, Bratislava, tel.: (+421) 910 985 066, e-mail: mario.chlan@stuba.sk



Obr. 1: Porovnanie výmeny dát pri klasickej 2D projekcii a pri BIM projektovaní [1].

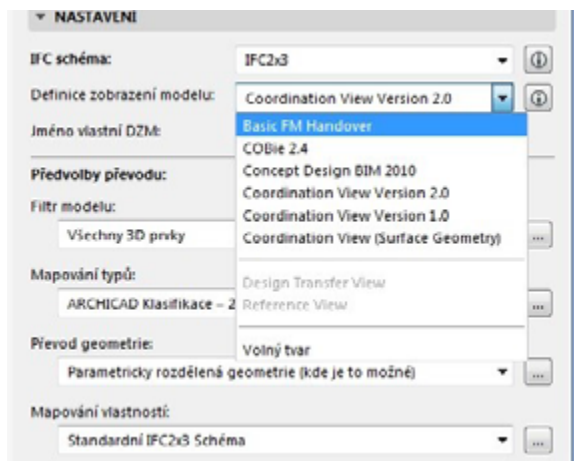
2. Fázy využitia BIM nástroja

2.1 Projekčná fáza využitia BIM

V počiatočnej fáze využívame bim softvér pre projekt stavby, vo všetkých projektových stupňoch. Spracovateľ vytvorí jednoduchý model so základnými informáciami o stavbe (rozмеры a plošné výmery), ktoré stavebný inžinier postupne naplní informáciami potrebnými pre jednotlivé projektové stupne. Výhodou BIM softvéru je uľahčenie toku informácií medzi jednotlivými profesiami zúčastnenými pri projektovej fáze. Nástrojom pre komunikáciu je štandardizovaný a normou predpísaný IFC formát súboru. IFC vie byť nositeľom grafických aj negrafických informácií potrebných pre správny návrh budovy. Tento typ súboru umožňuje výmenu a editáciu dát medzi autorskými BIM aplikáciami. Je ale veľmi dôležité určiť aké informácie bude IFC súbor obsahovať. Štandardy IFC nepredpisujú akých informácií má byť nositeľom. Je potrebné zvoliť alebo vytvoriť schému vlastností modelu. K tomu poslúžia takzvané MVD². Dôležitý je vždy účel, na ktorý majú BIM dáta slúžiť[2]. Napríklad pre facility management to môže byť dátová štruktúra CoBie³. [3]

²Definícia modelu zobrazenie- schéma informácií ktoré model obsahuje
(angl. Model View Definitions, skratka MVD)

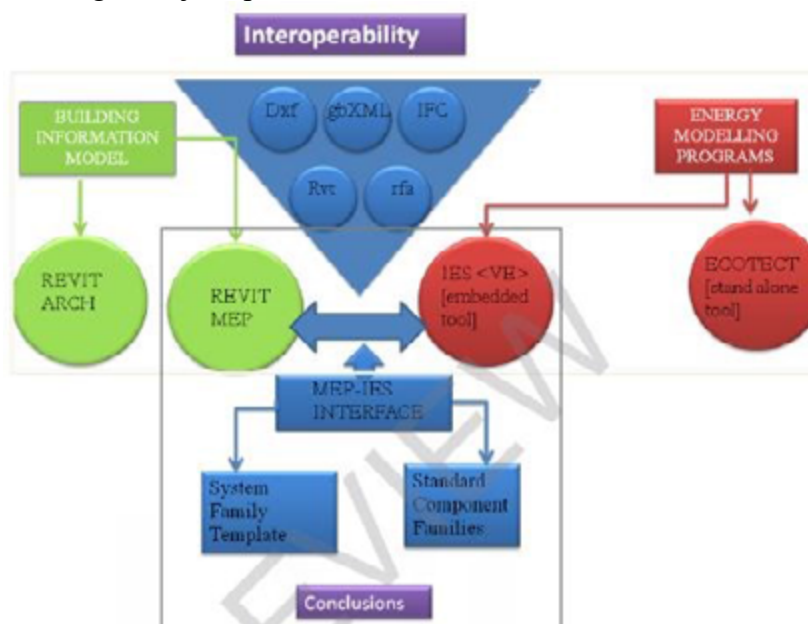
³ Cobie- štandardizovaná schéma modelu zobrazenia využívaná hlavne v USA pri správe budov



Obr. 2: Nastavenie MVD pri exporte IFC v užívateľskom prostredí programu Archicad 22

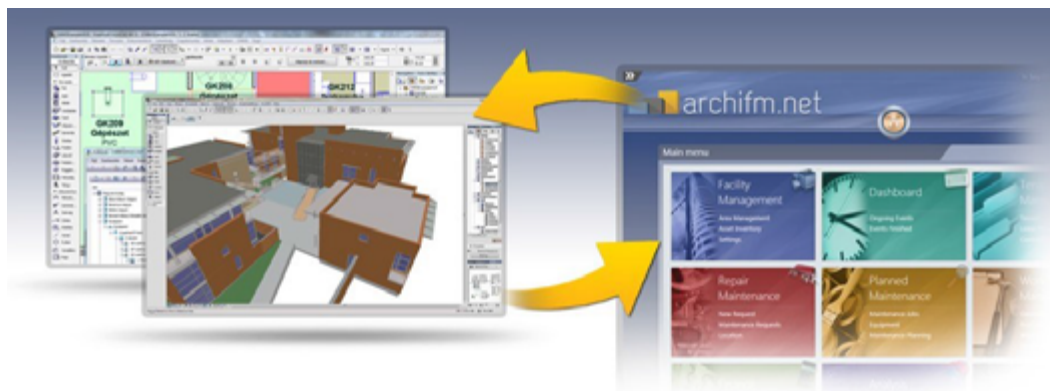
2.2 Použitie pri správe budov využitím simulácie správania budovy

Aktualizovaním jestvujúceho bim modelu na projekt skutočného vyhotovenia vzniká digitálne dvojča budovy. V tejto fáze vznikne dokonalá kópia budovy využiteľná na analýzu a simuláciu rôznych situácií, v ktorých sa budova počas životného cyklu nachádza. Najvýznamnejšou pre ekonomické hospodárenie je energetická analýza. Analýza prebieha v konkrétnom software, ktorý využíva formát EAM(Energy Analysys Models). EAM je geometrický model reprezentujúci danú budovu. Jedná sa o zmenu formy a usporiadania budovy do výpočtovej siete. Tento analytický formát nemusí byť znovu pracne namodelovaný ale využíva 3D výstup z BIM softvéru. Okrem geometrie vieme z modelu získať pri exporte aj množstvo negrafických informácií. BIM tak napomáha s analýzou budovy, v súvislosti s cieľom trvalej udržateľnosti. Pomocou dát a informácií o zapracovaných prvkoch a materiáloch vieme vypracovať porovnania zamerané na životnosť jednotlivých prvkov, čo zaručí ľahšie posudzovanie ekonomickej návratnosti investície. Digitálne dvojča slúži potom ako ustavične aktualizovaná databáza pre získané dáta potrebné pre programy vyvinuté na zlepšenie energetickej hospodárnosti.



Obr. 3: Schéma spolupráce EAM(Energy Analysys Models) a softvéru Revit [4].

2.3 Využitie BIM pri správe budov



Obr.4: Příklad prepojenia BIM modelu s FM softvérom(Archifm) [5].

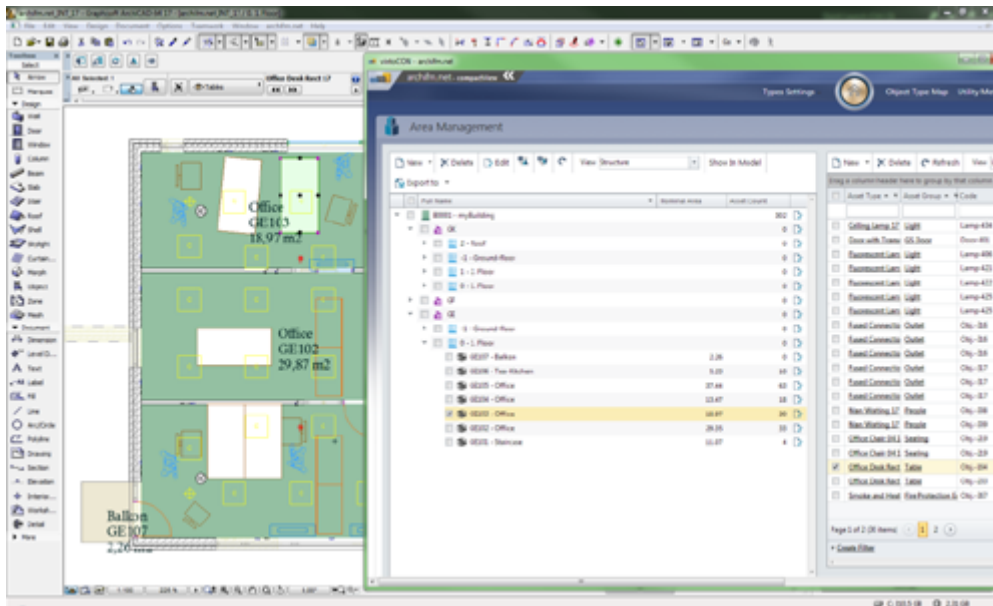
Informáciami naplnený model sa po prepojení s FM softvéromi (Archi FM, Chastia FM, BIM point, Archibus FM) stáva súčasťou databázy pre správu majetku. Pretavený model môže správcovi slúžiť minimálne na prezeranie a ľahšie orientovanie sa v priestoroch a jednotlivých súčiastiach budovy. Je umožnené dohľadanie konkrétneho prvku za pomoci vlastností z BIM prostredia(ID, príslušnosť k poschodiu alebo miestnosti, sériové číslo).Majiteľ si tak vie prezerat' majetok a jeho umiestnenie a usporiadať si tento výpis majetku podľa napr. vypršania záručnej doby.

Jeho následné zobrazenie v prehliadači uľahčí a zefektívni prácu napr. servisného technika. Databáza môže byť potom doplnená o FM dáta ako sú revízne správy a manuály jednotlivých zariadení a označenie jednotlivých prvkov. Model sa tak stáva jediným a úplným nosičom všetkých potrebných dát na jednom mieste v reálnom čase a online. Nakoľko FM software fungujú prostredníctvom cloudu, je prístupné mobilné prepojenie v prenosnom zariadení. Potrebná oprava a revízia je potom prehľadnejšia a kontrolovaná.



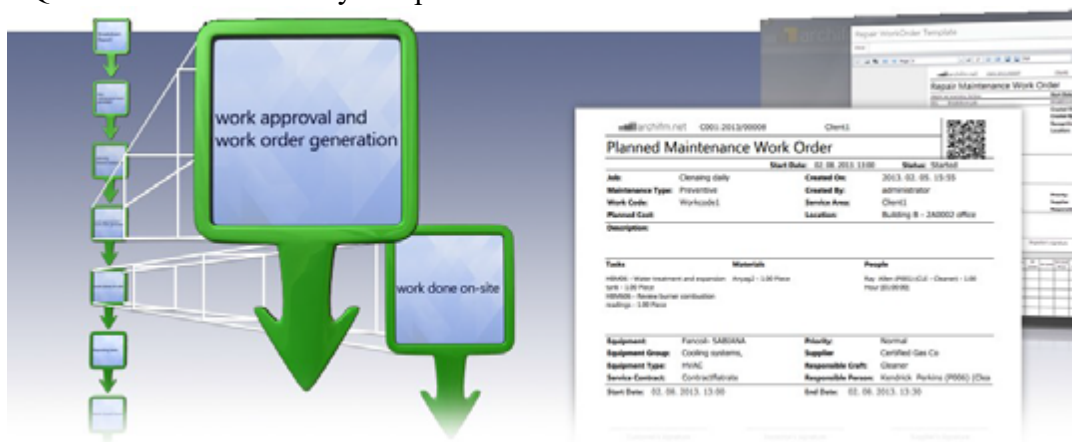
Obr.5: CAFM mobilná aplikácia umožňuje prácu v BIM priamo v teréne [6].

V takto prepojených softvéroch vzniká možnosť plánovania požiadaviek na údržbu a revíziu. Je ale potrebná neustála aktualizácia obsiahnutých informácií. Model sa stáva IT manuálom pre správcu alebo majiteľa budovy. Ďalším výstupom z BIM hodnotným pre správu budovy sú reálne výkazy výmer a množstvá jednotlivých prvkov. Po zadaní konkrétnej požiadavky (napr. plocha miestnosti) vie koordinátor dodať informácie s presným údajom z 3D modelu. To v teórii znamená že BIM nástrojom vieme využívať priestor omnoho efektívnejšie. Pri pravidelnej aktualizácii ma majiteľ k dispozícii informácie o plochách, ale aj o vlastnostiach zabudovaných prvkov a konkrétnom mieste, kde sa nachádzajú.



Obr. 3: Návaznosť plochy predajne(FM softvér) na vlastnosť v BIM(Archicad) [7].

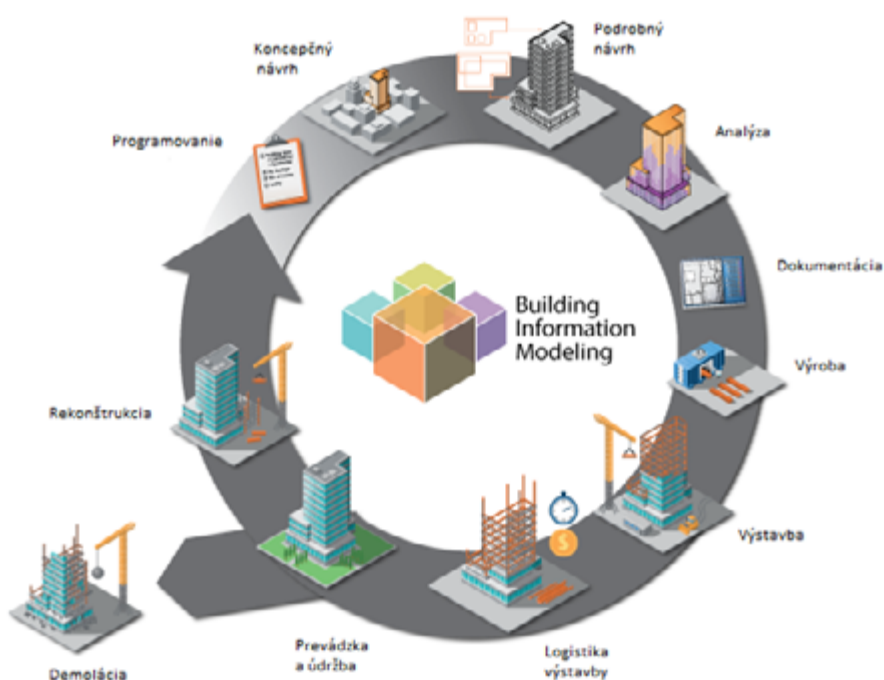
Pri správe budov za pomoci BIM je možné údržbu plánovať a konkrétneho pracovníka kontrolovať. Správa budov sa tak stáva dokonale prehľadná. Informácia o danej skutočnosti je uložená a priradená ku konkrétnemu prvku. V praxi softvér pracovníka vopred upozorní na potrebný servis vygenerovaným požiadavky a doplní informáciu o umiestnení konkrétneho prvku a typu požadovaného úkonu. Pre záznam o ukončení servisu pracovník informuje softvér napr. pomocou načítania QR kódu z miesta údržby do aplikácie FM softvéru.



Obr. 4: Softvér automaticky generuje plánované aj neplánované údržby [8].

3. Záver

Digitálna podpora BIM zohráva hlavnú úlohu pri tvorení novej budovy. Pomocou jej ľahšieho návrhu je energetická náročnosť a náročnosť budovy na prevádzku a náklady s ňou spojené oveľa lepšia ako skúšaním optimalizácie už jestvujúcej konštrukcie. Tento nástroj na modelovanie sa tak stáva výhodným nie len pre inžinierov pri návrhu, ale najmä budúcemu používateľovi. Takýmto užívateľom je najčastejšie správca alebo majiteľ budovy. Do rúk dostáva kvalitne navrhnutý celok s transparentnými informáciami o jeho jednotlivých súčiastiach, zabezpečený fungujúcou správou budovy za pomoci BIM technológie.



Obr. 4: BIM pri životnom cykle budovy [9].

Literatúra

- [1] Dostupné z.: <http://biblus.accasoftware.com/en/ifc-whats-it-for-whats-its-connection-with-bim/>
- [2] *Industry Foundation Classes - chápeme je správně? 2017* [online]. Dostupné z: <https://www.bimfo.cz/Aktuality/Myty-o-BIM-Co-je-a-co-neni-IFC.aspx>
- [3] *The COBie standard based on the buildingSMART IFC data model* [online]. Dostupné z: <http://open.bimreal.com/bim/index.php/2012/12/13/the-cobie-standard-based-on-the-buildingsmart-ifc-data-model/>
- [4] Kumar S.: *Interoperability between building information models (BIM) and energy analysis programs*, s.5, University of Southern California, ProQuest Dissertations Publishing, 2008. 1454072.
- [5] Dostupné z: <http://www.archifm.net/archifm-net-functionality/archifm-cafm-area-management/>

- [6] Dostupné z: <http://www.archifm.net/archifm-net-functionality/caf-m-mobile-solution/>
- [7] Dostupné z: <http://www.archifm.net/archifm-net-functionality/archifm-caf-m-area-management/#prettyPhoto>
- [8] Dostupné z: <http://www.archifm.net/archifm-net-modules/caf-m-reporting-analysis/>
- [9] Dostupné z: <http://buildipedia.com/aec-pros/design-news/the-daily-life-of-building-information-modeling-bim>

Josip Klem – Ing., SvF STU, Radlinského 11, Bratislava

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb (TKPS), 2. ročník

PRÚDENIE VZDUCHU A VZOSTUP TEPLoty V DVOJITEJ TRANSPARENTNEJ FASÁDE MECHANICKY VETRANEJ POMOCO REKUPERAČNEJ JEDNOTKY

Airflow and temperature rise in the double skin façade mechanically ventilated by heat recovery unit

Abstract

This paper deals with the rise of a temperature in the double skin facade in the winter season. Double skin facade is mechanically ventilated by heat recovery unit. Temperature rise in the cavity of the double skin facade is caused by solar radiation. With the help of Computational fluid dynamics (CFD) program, heat rise is calculated in the cavity of the double skin façade with the narrow cavity. In conclusion it summarizes the results of the simulation and shows that this approach can increase the efficiency of the heat recovery unit.

Kľúčové slová

Dvojité transparentná fasáda, Simulácia, Ansys, Rekuperačná jednotka, CFD

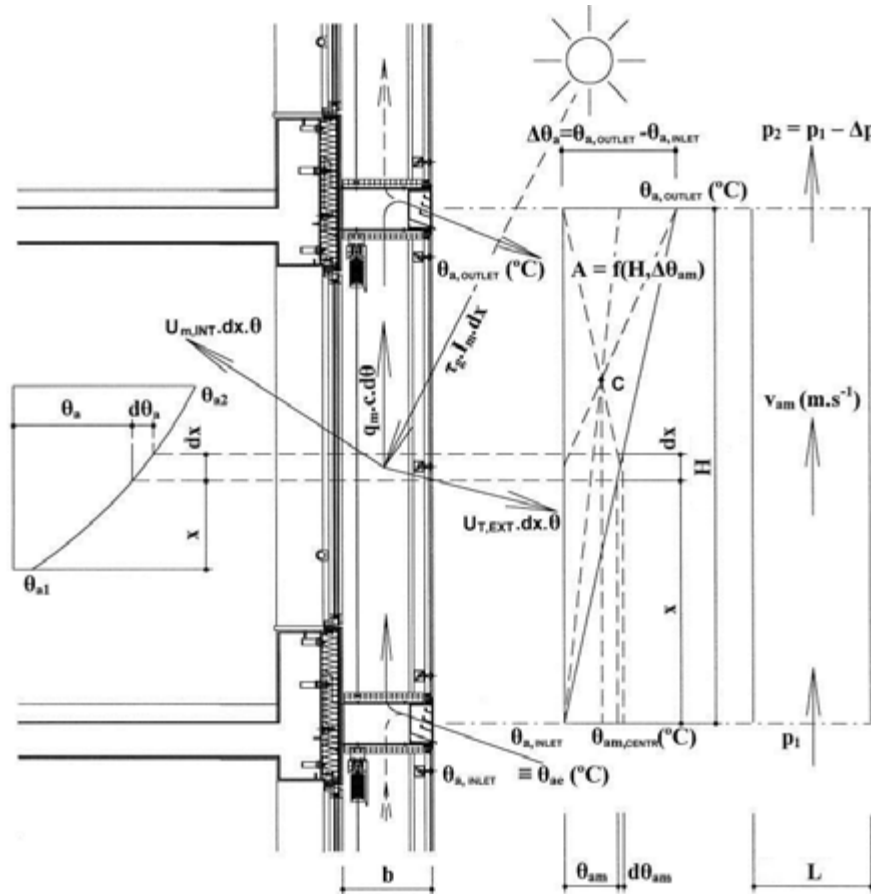
1. Úvod

Zvyšujúci sa trend v navrhovaní fasád budov – dvojité transparentná fasáda sa stáva viac a viac populárna medzi architektami v Európe. Dvojité transparentná fasáda je založená na teórii fyzických medzipriestorov - obrázok 1. Dvojité transparentná fasáda využíva potenciál alternatívneho zdroja energie – slnečného žiarenia a pomocou fyzického fenoménu transformácie krátkovlnného slnečného žiarenia na dlhovlnne tepelné žiarenie zohrieva vzduch v jej medzipriestore. Najčastejší typ dvojitej transparentnej fasády je prirodzene vetraná dvojité transparentná fasáda. V zimnom období má prirodzene vetraná dvojité transparentná fasáda energetickú účinnosť 25 až 30%. Väčšina získavaného tepla sa z medzipriestoru dvojitej transparentnej fasády s prirodzeným vetraním odvádza do exteriéru bez ďalšieho použitia. Jedna z možností využitia tohto tepla v zimnom období je inštalácia rekuperačnej jednotky do dvojitej transparentnej fasády. [1]

2. Fyzický medzipriestor dvojitej transparentnej fasády ako zdroj zohriateho vzduchu pre rekuperačnú jednotku v zimnom období

Rekuperácia, alebo spätne získavanie tepla, je dej v ktorom je prívodový, čerstvý vzduch predhriaty pomocou odvodového, odpadového vzduchu. Teplý vzduch teda nie je odvádzaný do exteriéru oknom bez využitia, ale väčšinu tepla odovzdá čerstvému, privádzanému vzduchu vo výmenníku tepla. Tento článok sa zaoberá využitím dvojitej transparentnej fasády na predhriatie vzduchu pre rekuperačnú jednotku v zimnom období. Z dôvodu relatívne malých prietokov vzduchu rekuperačnej jednotky (15 až 90 m³/h) sme zvolili progresívnu fasádu s úzkym štrbinovým medzipriestorom so šírkou 250 mm a s účinnou výškou rovnakou výške jedného podlažia H = 3000 mm - Obrázok 2. sme zvolili 2 rôzne dĺžky sekcií dvojitej transparentnej fasády, 1500 mm a 3000 mm. Vonkajšie zasklenie dvojitej transparentnej fasády tvorí jednoduché tvrdené sklo hrúbky 12 mm, odrazivosť, R_E = 6%, absorpcia, A_E = 34%, priepustnosť, T_E = 60%, celková priepustnosť slnečnej energie, g = 70%,

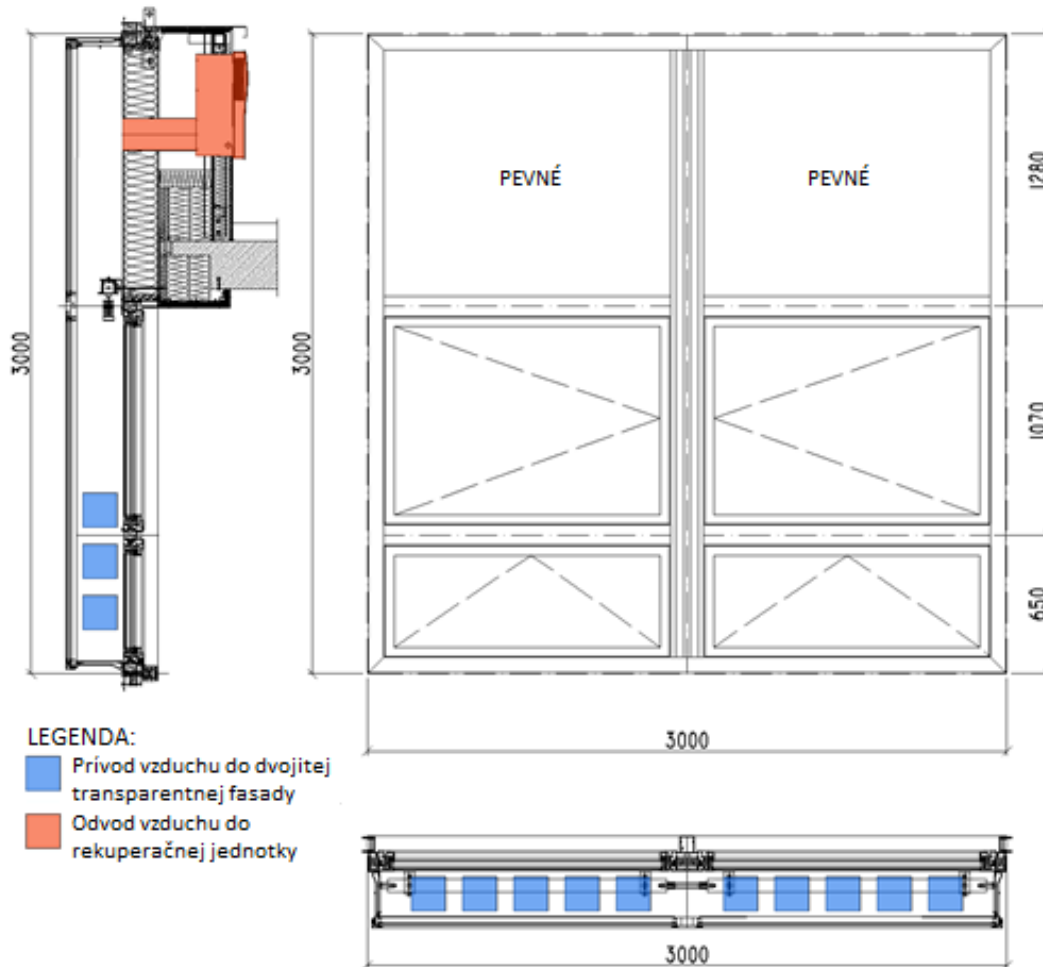
koeficient prestupu tepla, $U_g = 5.5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. Transparentná časť vnútornej časti dvojitej transparentnej fasády pozostáva z hliníkových profilov s rámovými profilmi Schüco série AWS 90.SI ($U_f \geq 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$) a nízkoemisných izolačných trojskiel, odrazivosť, $R_E = 33\%$, absorpcia, $A_E = 20\%$, priepustnosť, $T_E = 47\%$, celková priepustnosť slnečnej energie, $g = 45\%$, koeficient prestupu tepla, $U_g = 0.6 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$.



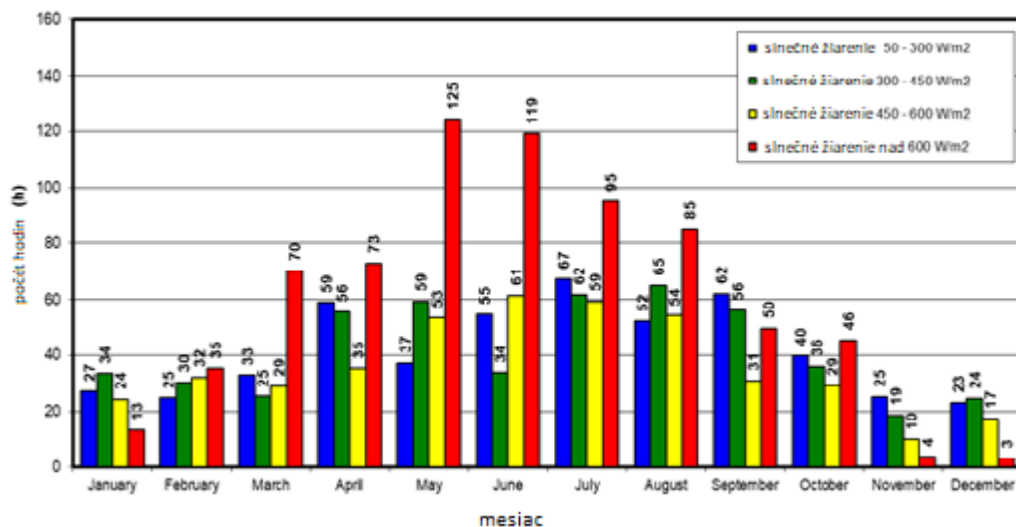
Obrázok 1: Základná schéma na kvantifikáciu tepelného, aerodynamického a energetického režimu dvojitej transparentnej fasády s otvoreným okruhom. Výška medzipriestoru úseku H (m) je určená výškou podlažia. [2]

Rekuperčná jednotka Lunos Nexxt bola vybraná na simuláciu. Rekuperčná jednotka s účinnosťou až 85% a maximálnym prietokom vzduchu $90 \text{ m}^3/\text{h}$. Minimálny prietok vzduchu je $15 \text{ m}^3/\text{h}$. Rekuperčná jednotka je umiestnená v hornej časti dvojitej transparentnej fasády – Obrázok 2. V zime bude rekuperčná jednotka odoberať tepelne upravený vzduch z medzipriestoru dvojitej transparentnej fasády, čím sa zlepši účinnosť dvojitej transparentnej fasády. V lete bude odoberať vzduch z exteriéru, ktorý je chladnejší ako vzduch v medzipriestore dvojitej transparentnej fasády. Účinnosť využitia upraveného vzduchu z medzipriestoru dvojitej transparentnej fasády významne závisí od počtu slnečných hodín a intenzity slnečného žiarenia. Obrázok 3 ukazuje, že v Bratislavskom kraji je doba slnečného žiarenia nad $600 \text{ W}/\text{m}^2$ takmer 245 hodín; je to 177 hodín pre intenzitu v rozsahu 450 až $600 \text{ W}/\text{m}^2$ a 224 hodín pre intenzitu v rozsahu 300 až $450 \text{ W}/\text{m}^2$ počas vykurovacej sezóny (október až apríl). Údaje o klimatických podmienkach sú založené na referenčnom roku. Uskutočnili sme simuláciu s 3 rôznymi prietokmi vzduchu a 4 slnečnými žiareniami, maximálnym prietokom vzduchu $90 \text{ m}^3/\text{h}$, a prietokmi vzduchu $50 \text{ m}^3/\text{h}$ a $15 \text{ m}^3/\text{h}$;

slnečné žiarenie sa pohybuje od 150 W/m^2 do 600 W/m^2 . Prúdenie vzduchu v medzipriestore dvojitej transparentnej fasády je riadené pomocou rekuperačnej jednotky.



Obrázok 2: Konštrukčné riešenie dvojitej transparentnej fasády s dĺžkou sekcie 3000 mm a polohou rekuperačnej jednotky



Obrázok 3: Intenzita slnečného žiarenia v testovacom referenčnom klimatickom roku v Bratislave. [3]

Prúdenie vzduchu a vzostup teploty v medzipriestore dvojitej transparentnej fasády boli simulované v programe Ansys Fluent 2019 R1. Pri simulácii sa brali do úvahy tieto predpoklady: prietok v ustálenom stave, newtonovská tekutina, nestlačiteľný turbulentný tok, konštantné fyzikálne vlastnosti a slnečné žiarenie. Tieto predpoklady vedú k týmto rovniciam.

Ide o:

Rovnice kontinuity:

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

Momentové rovnice:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}, \quad (2)$$

Energetické rovnice:

$$\rho c_p(\mathbf{u} \cdot \nabla T) = \lambda \nabla^2 T, \quad (3)$$

kde \mathbf{u} je rýchlosť [m/s], ρ je hustota [kg/m³], μ je viskozita [Pa.s], c_p je špecifické teplo [J/kg.K], λ je tepelná vodivosť [W/m.K] a T je teplota [°C].

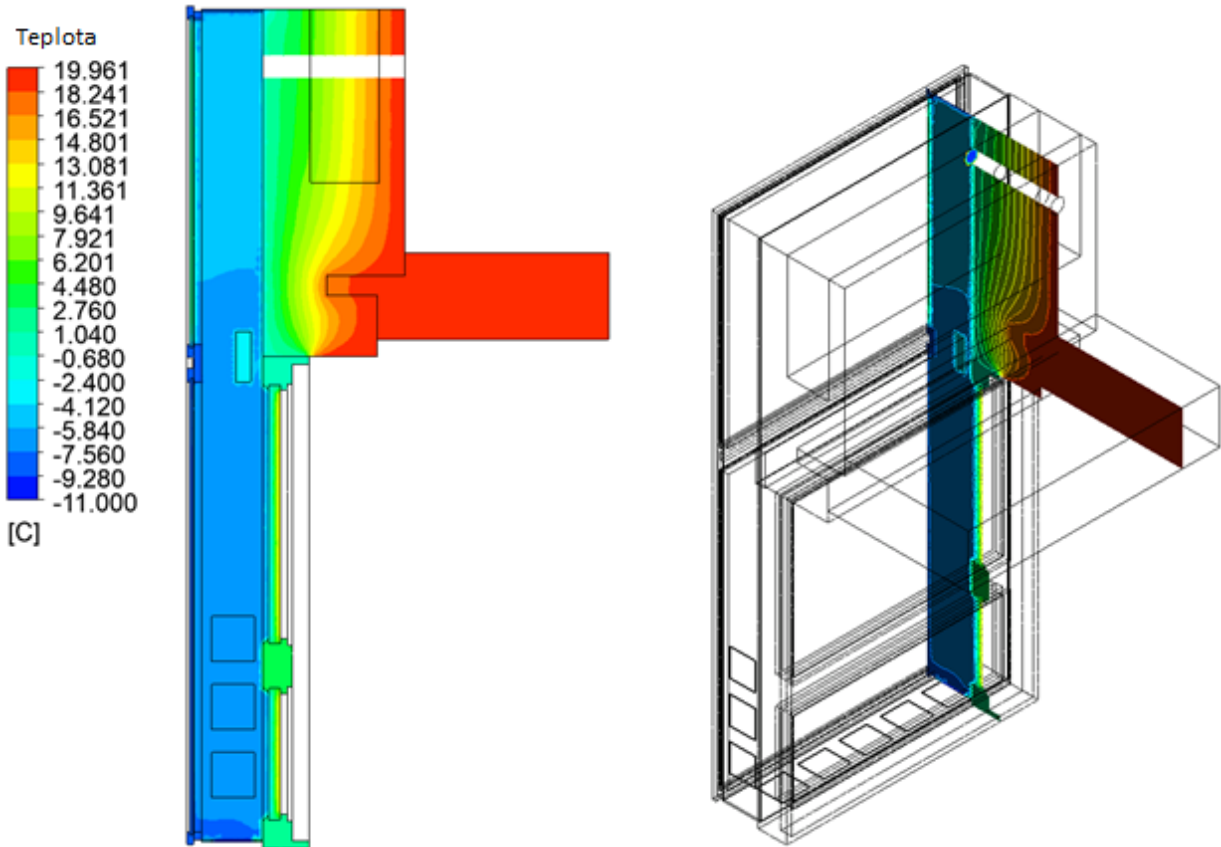
Pri modelovaní turbulencie používame k - ϵ model rovníc (Wilcox, 2006) s transportnými rovnicami formulovanými ako:

$$\nabla \cdot \left[\rho k \mathbf{u} - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] = P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k, \quad (4)$$

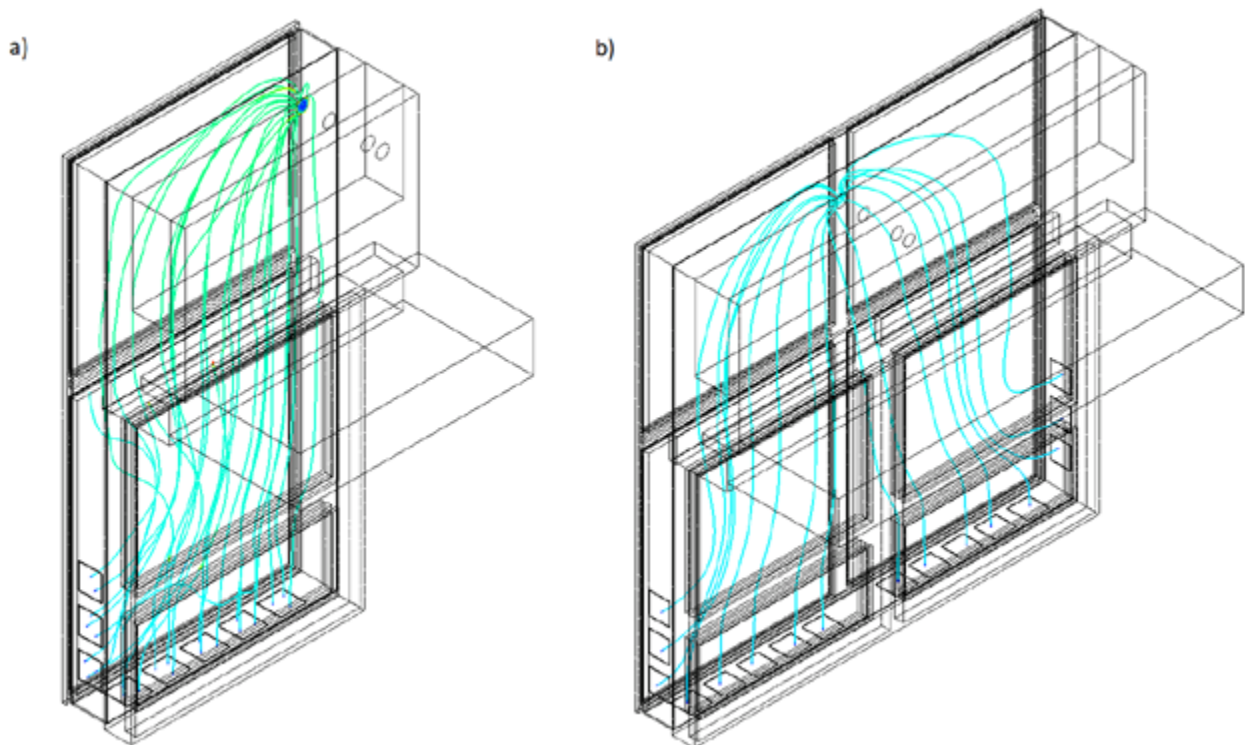
$$\nabla \cdot \left[\rho \epsilon \mathbf{u} - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \epsilon \right] = \rho C_1 S_\epsilon - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} - C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} P_b + S_\epsilon, \quad (5)$$

Všetky rovnice boli integrované použitím komotívneho CFD balíka ANSYS Fluent (Ansys, 2019 R1), ktorý používa metódu konečných prvkov (Eymard, 2001).

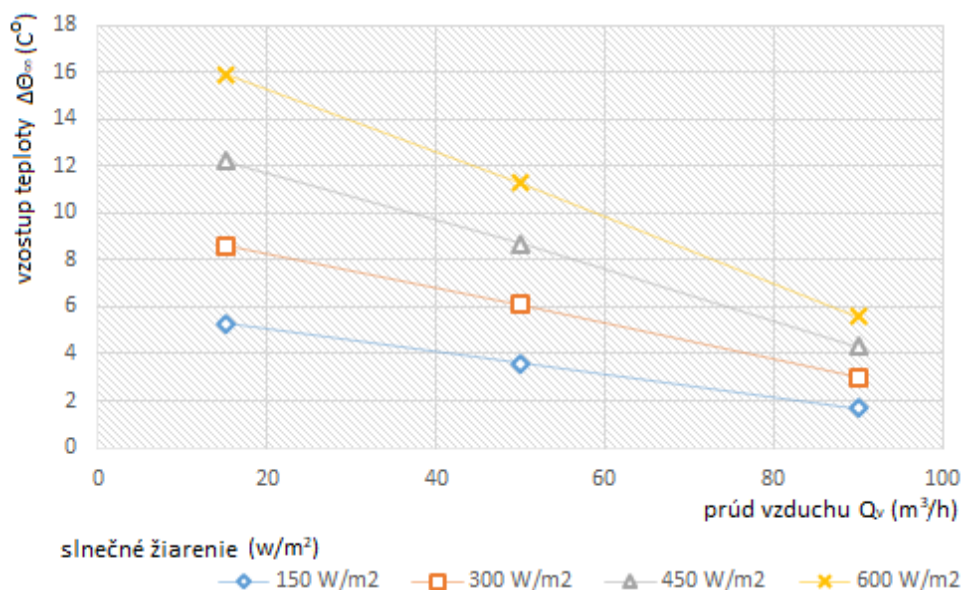
Obrázok 4 zobrazuje príklad modelu fasády v programe Ansys Fluent CFD s dĺžkou sekcie 3000 mm, slnečným žiareným 600 W/m² prietokom vzduchu 90 m³/h. Obrázok 5 zobrazuje CFD model dvojitej transparentnej fasády v simulačnom softvéri Ansys Fluent - prietok vzduchu 50 m³/h s dĺžkou sekcie: a) 1500 mm a b) 3000 mm. Obrázok 6 a obrázok 7 ukazujú výsledky simulácie - zvýšenie teploty v vzostup teploty v medzipriestore dvojitej transparentnej fasády ako funkciu intenzity slnečného žiarenia a prúdenia vzduchu medzipriestorom. Všetky výsledky sú založené na vonkajšej teplote vzduchu -11 °C a vnútornej teplote vzduchu +20 °C. V prípade 1 (dĺžka sekcie 3000 mm) sa teplota vzduchu v medzipriestore pohybuje medzi 1,70 K pre minimálne slnečné žiarenie (150 W/m²) a maximálny prietok vzduchu (90 m³/h) a 15,90 K pre maximálne solárne žiarenie (600 W/m²) a minimálny prietok vzduchu (15 m³/h). V prípade 2 (dĺžka sekcie 1500 mm) sa teplota vzduchu v medzipriestore pohybuje medzi 1,10 K pre minimálne slnečné žiarenie (150 W/m²) a maximálny prietok vzduchu (90 m³/h) a 10,50 K pre maximálne slnečné žiarenie. (600 W/m²) a minimálny prietok vzduchu (15 m³/h). Kombinovanie rekuperačnej jednotky s dvojitou transparentnou fasádou umožňuje výrazne energetické zisky počas vykurovacieho obdobia.



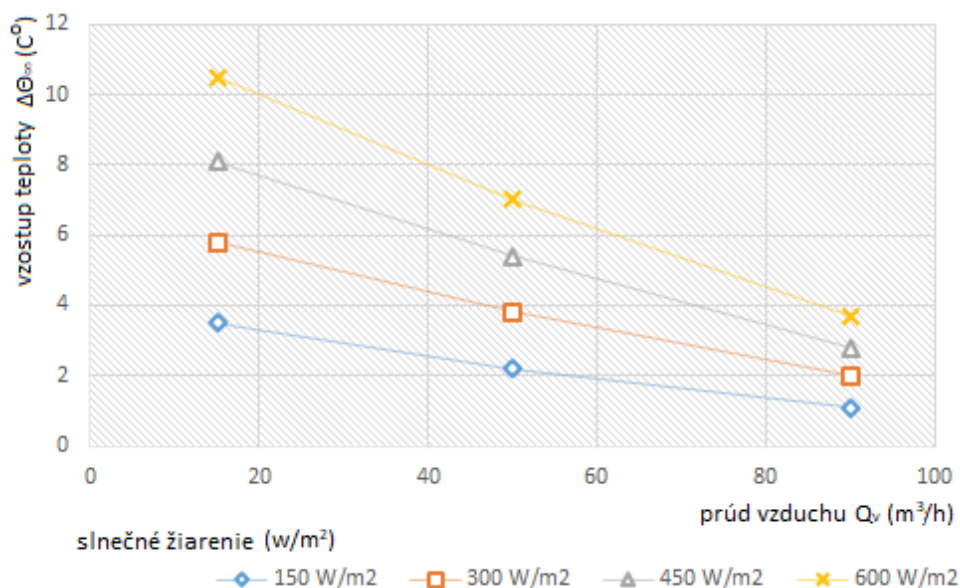
Obrázok 4: CFD Model dvojitej transparentnej fasády v simulačnom softvéri Ansys Fluent - teplota vzduchu (°C) pri prietoku vzduchu $50 \text{ m}^3/\text{h}$ a solárne žiarenie $450 \text{ W}/\text{m}^2$



Obrázok 5: CFD model dvojitej transparentnej fasády v simulačnom softvéri Ansys Fluent - prietok vzduchu $50 \text{ m}^3/\text{h}$ s dĺžkou sekcie: a) 1500 mm, b) 3000 m



Obrázok 6: Vzostup teploty vzduchu v dvojitej transparentnej fasáde ako funkcia intenzity slnečného žiarenia a prúdenia vzduchu medzipriestorom s dĺžkou sekcie 3000 mm.



Obrázok 7: Vzostup teploty vzduchu v dvojitej transparentnej fasáde ako funkcia intenzity slnečného žiarenia a prúdenia vzduchu medzipriestorom s dĺžkou sekcie 1500 mm.

3. Záver

Ako je znázornené na obrázkoch 6 a 7, zdá sa, že kombinácia dvojitej transparentnej fasády s úzkym štrbinovým medzipriestorom a rekuperačnej jednotky má výhody v úspore energie počas vykurovacieho obdobia v Bratislavskom kraji. Najefektívnejšia kombinácia týchto dvoch systémov je, najmä pri nižších prietokoch vzduchu (15 m³/h a 50 m³/h), kde je výrazný nárast teploty (až do 15,9° K). Aj pri slnečnom žiarení 150 W/m² existujú určité úspory energie (s dĺžkou sekcie 3000 mm a minimálnym prietokom 15 m³/h zvýšenie teploty je 3,60 K). Všetky parametre, slnečné žiarenie, prietok vzduchu medzipriestorom a dĺžka sekcie majú výrazný vplyv na teplotu vzduchu na výstupe.

Naším nasledujúcim plánom je nájsť optimálnu dĺžku a šírku dvojitej fasády s úzkym štrbinovým medzipristorom, s ktorou plánujeme pokračovať v experimentovaní.

4. Pod'akovanie

Táto práca bola vykonaná s podporou Vedeckej grantovej agentúry MŠVVŠ SR a SAV pod VEGA 1/0113/19 a Slovenskej agentúry pre výskum a vývoj na základe zmluvy č. APVV-16-0126.

Literatúra

- [1] Bielek, B., et al., Dvojité transparentné budov, Coreal, Bratislava, 2002.
- [2] Bielek, B., et al., Dvojité transparentné budov, 2. diel, Coreal, Bratislava, 2002.
- [3] Bielek, M., et al., Model vonkajšej klímy – referenčný rok pre I. teplotnú oblasť SR. STU, Bratislava, 1993
- [4] Fluent, CFD, 3D Airflow Modeling Software, Ansys Inc., USA, Version 2019 R1.

Veronika Klincová¹

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, 1. ročník

KLIMATICKÉ ZMENY

CLIMATE CHANGE

Abstract

Global warming and climate change are related to the increase in average global temperatures. Some of the causes of climate change are natural, others are related to human activity. Obviously, human activities have caused most of the global warming of this century by releasing huge amounts of heat-trapping gases, called greenhouse gases, into the atmosphere.

The article discusses the current state of climate change, its causes and consequences for the environment. Climate change is a particularly topical and debated issue worldwide and it is evidenced by many world-class meetings, negotiations and summits, where world leaders are looking for concrete measures and solutions to reduce greenhouse gas emissions and achieve climate change neutrality.

Kľúčové slová

Klimatické zmeny, globálne otepľovanie, skleníkové plyny, emisie, neutralita

1. Súčasný stav problematiky klimatických zmien

1.1 Klimatické zmeny

Podnebie Zeme sa v priebehu histórie zmenilo. Za posledných 650 000 rokov prebehlo sedem cyklov ľadovcového postupu a ústupu, pričom koniec poslednej doby ľadovej pred asi 7 000 000 rokmi znamenal začiatok modernej klimatickej éry a ľudskej civilizácie. [16] Je isté, že planéta Zem sa v priebehu týchto cyklov prirodzene zahriala a ochladila, avšak tieto cykly boli omnoho pomalšie a trvali milióny rokov, zatiaľ čo teraz, v období asi 200 rokov, dosahujeme úrovně, ktorá v minulosti priniesla vyhynutie. [3]

Zvláštny význam je potrebné venovať predovšetkým súčasnému trendu otepľovania planéty, ktorý je výsledkom ľudskej činnosti približne od polovice 20. storočia a ktorá postupuje rýchlosťou, ktorá je neudržateľná. Keď teplota planéty stúpa viac, ako by prirodzene mala, dochádza k trvalej zmene klímy.

1.2 Príčiny zmeny klímy

Za hlavnú príčinu klimatických zmien sa považuje globálne otepľovanie, ktoré je spôsobené skleníkovým efektom. Skleníkový efekt je prírodný proces, v rámci ktorého si atmosféra Zeme zachováva časť tepla zo slnečného žiarenia, čo umožňuje vytvárať na planéte vhodné podmienky pre hostiteľský život. [1] Problémom je to, že ľudské činnosti súčasnej civilizácie skleníkový efekt maximalizujú a spôsobujú väčšie zvýšenie teploty planéty ako by mali.

¹ Veronika, Klincová, Ing., Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Skleníkové plyny

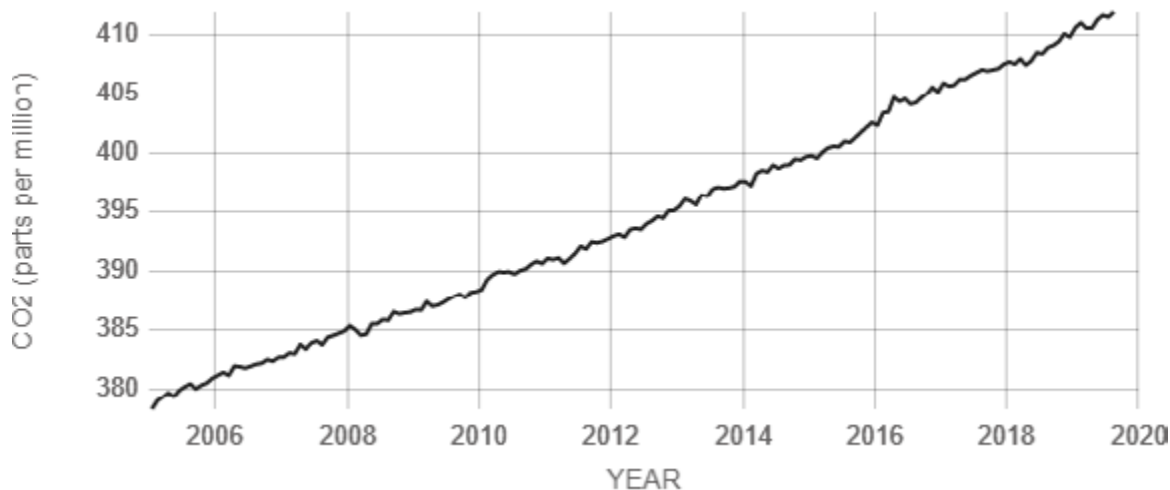
Niektoré z plynov v atmosfére majú schopnosť blokovať únik tepla, t.j. zadržujú slnečné teplo a znemožňujú jeho návrat späť do vesmíru. Mnohé z týchto plynov sa v prírode vyskytujú bežne, avšak v dôsledku ľudskej činnosti sa ich koncentrácia v atmosfére neustále zvyšuje.

Medzi plyny, ktoré prispievajú k skleníkovému efektu, patria:

- Oxid uhličitý (CO₂): je zložka atmosféry, ktorá sa uvoľňuje prírodnými procesmi, ako sú napríklad výbuchy sopiek a dýchanie, ale aj umelými procesmi, ktoré zahŕňajú ľudské činnosti, odlesňovanie a spaľovanie fosílnych palív predovšetkým pri výrobe elektriny, doprave, kúrení, priemysle a stavebníctve.
- Metán: je uhl'ovodíkový plyn, ktorý vzniká prírodnými aj umelými procesmi, napríklad rozkladom odpadu na skládkach, v poľnohospodárstve predovšetkým pri pestovaní ryže, pri hospodárení s hnojom v súvislosti s chovom domácich zvierat a v prírode pri trávení prežúvavcov. V porovnaní s oxidom uhličitým je metán oveľa aktívnejší skleníkový plyn, avšak v atmosfére má menšie zastúpenie.
- Chlórfluórované uhl'ovodíky (CFC): sú syntetické zlúčeniny priemyselného pôvodu, ktorých výroba a uvoľňovanie do atmosféry je v súčasnosti vo veľkej miere regulované.
- Oxid dusný: je skleníkový plyn, ktorá vnika pri kultivácii pôdy používaním rôznych druhov hnojív, spaľovaním fosílnych palív a biomasy a pri výrobe kyseliny dusičnej. [14]

Ľudská činnosť

Odborníci po celom svete sa zhodujú, že rozhodujúcim bodom, kedy začali emisie skleníkových plynov v atmosfére a tým aj globálna teplota stúpať, je obdobie priemyselnej revolúcie. Priemyselná činnosť modernej civilizácie zvýšila za posledných 150 rokov úroveň atmosferického oxidu uhličitého z 280 ppm na 400 ppm. [15]



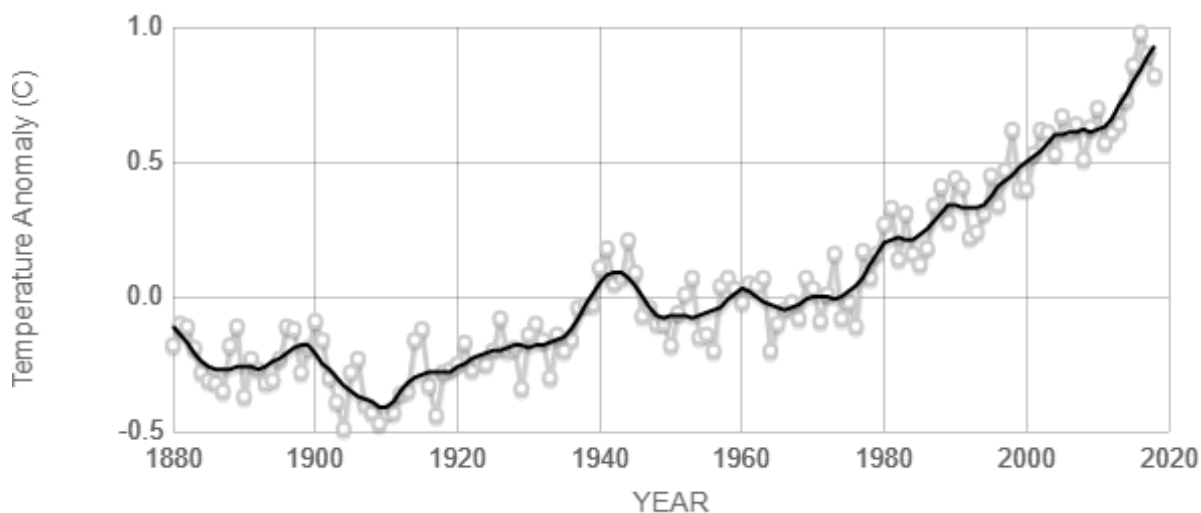
Obrázok 1: Nárast koncentrácie oxidu uhličitého v polovici troposféry v dieloch na milión (ppm) [climate.nasa.gov]

Do úvahy treba zobrať aj populačný rast obyvateľstva Zeme. Kým ešte v roku 1750 bolo na Zemi menej ako 800 miliónov ľudí, v roku 2019 toto číslo atakuje takmer 8 miliárd, s čím súvisí nárast využívania zdrojov, neustále sa zvyšujúca spotreba surovín, zvyšujúci sa dopyt po energii a výrobe, a to najmä z fosílnych palív. [4] Pri spaľovaní ropy, zemného plynu a čierneho uhlia vzniká oxid uhličitý a oxid dusný. Oxid uhličitý je najbežnejším skleníkovým plynom, ktorý vzniká v dôsledku

ľudskej činnosti, a ktorý je zodpovedný za 64 % globálneho otepľovania spôsobeného človekom. Oxid dusný sa podieľa 6 % a metán 17 % podielom. [9]

So zvyšujúcim sa množstvom ľudí na Zemi sa zvyšuje aj množstvo chovaných hospodárskych zvierat, ktoré pri trávení produkujú veľké množstvo metánu, vo veľkom sa v poľnohospodárstve využívajú hnojivá produkujúce oxid dusný a zo zvyšujúcim sa dopytom po surovinách a priestore pre život dochádza k rozsiahlemu odlesňovaniu. Stromy majú schopnosť pohlcovať oxid uhličitý z atmosféry a tak dokážu prispievať k regulovaniu podnebia. Odlesňovaním sa však tento účinok vytráca, v dôsledku čoho sa do atmosféry dostáva oveľa viac oxidu uhličitého v porovnaní z minulosťou.

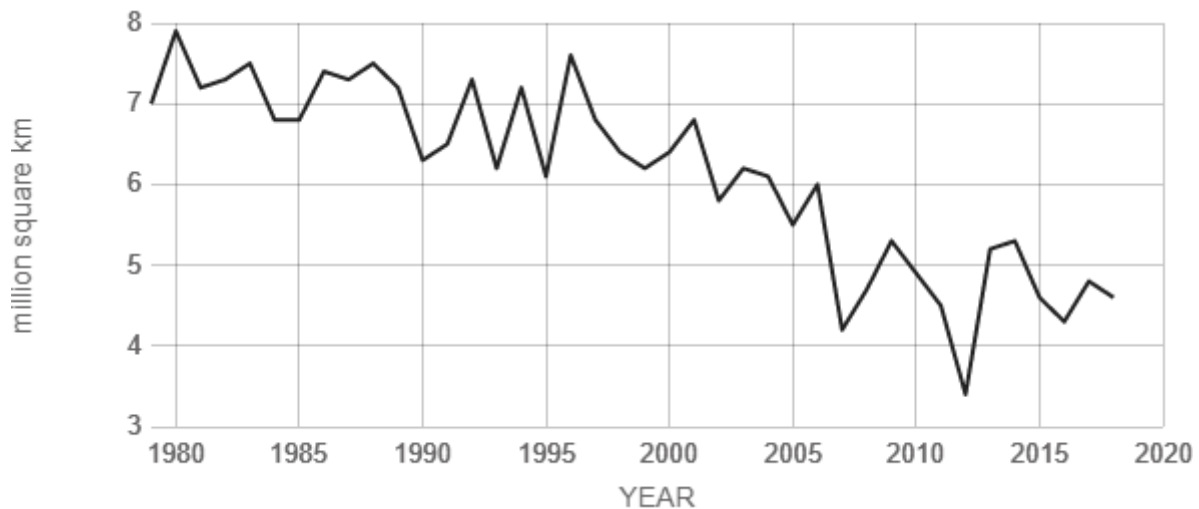
Na základe rozsiahlych meraní a pozorovaní svetoví odborníci tvrdia, že hlavnou príčinou otepľovania je od polovice 20. storočia ľudská činnosť. Priemerná globálna teplota je v súčasnosti o 0,85°C vyššia ako na konci 19. storočia. Dlhodobým cieľom medzinárodného spoločenstva je udržať otepľovanie pod hranicou 2°C, keďže prekročenie tejto hranice by mohlo spôsobiť nebezpečné, možno až katastrofické zmeny v životnom prostredí. [9]



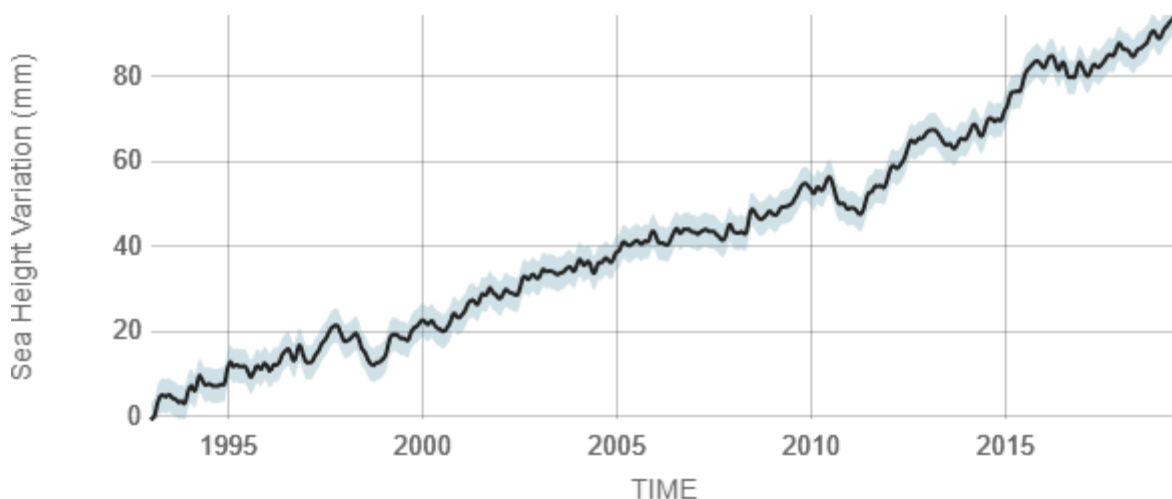
Obrázok 2: Zmena globálnej povrchovej teploty v porovnaní s priemernými teplotami 1951 - 1980 [climate.nasa.gov]

1.3 Dôsledky zmeny klímy

Globálne otepľovanie a s tým súvisiaca zmena klímy má viditeľné účinky na životné prostredie. Zvyšujúca sa teplota spôsobuje, že ľadovce na pólach sa topia a zmenšujú, v dôsledku čoho stúpa hladina mora, dochádza k záplavám a eróziám pobrežných a nízko položených oblastí a hrozí ponorenie pobrežných spoločenstiev a malých ostrovných štátov. Zmena životného prostredia zapríčiňuje masívnu migráciu rastlín a zvierat, mnohé choroby a zánik druhov, ktoré sa s klimatickými zmenami ťažko vyrovnávajú. Každoročne spôsobuje zmena v ekosystéme smrť 10 000 až 50 000 druhov. [2]



Obrázok 3: Priemerný mesačný rozsah arktického morského ľadu každý september o roku 1979, odvodený zo satelitných pozorovaní [climate.nasa.gov]



Obrázok 4: Zmena výšky hladiny mora od roku 1993 zo satelitných pozorovaní [climate.nasa.gov]

Zmena klímy umocňuje extrémne poveternostné prejavy počasia v podobe hurikánov, cyklónov, tajfúnov, extrémnych súch, povodní, dažďov a snehu, čo spôsobuje viac úmrtí, materiálnych škôd a masívne migrácie.

V Európe sú čoraz častejšie silné zrážky a extrémne výkyvy počasia. V severnej Európe došlo v posledných desaťročiach k výraznému zvýšeniu vlhkosti, ktorá by mohla spôsobovať zvýšenie výskytu záplav predovšetkým v zimnom období, naopak južnú a strednú Európu čoraz viac trápia vlny horúčav, v dôsledku čoho vznikajú rozsiahle lesné požiare a suchá. Tieto prejavy počasia môžu viesť k znižovaniu kvality vody a dostupnosti vodných zdrojov a k zvýšenému počtu úmrtí v dôsledku horúčav alebo chladu.

Extrémne prejavy počasia spôsobujú každoročne rozsiahle škody na majetku a ľudskom zdraví, čo predstavuje vysoké náklady pre hospodárstvo krajín. V období 1980 až 2011 boli povodňami zasiahnutých až 5,5 milióna ľudí, čo spôsobilo hospodárske straty vyše 90 miliárd eur. [10]

2. Opatrenia pre riešenie problematiky klimatických zmien

2.1 Opatrenia na svetovej politickej úrovni

Dohovor OSN o klíme

Rámcový dohovor Organizácie spojených národov o zmene klímy (UNFCCC) je hlavnou medzinárodnou zmluvou v boji proti klimatickej zmene, ktorý bol dohodnutý v roku 1992 v New Yorku a doposiaľ ho ratifikovalo 197 štátov sveta. Do platnosti vstúpil 21. marca 1994. Dohovor bol v roku 1997 rozšírený zmluvou, v ktorej boli zakotvené prísnejšie požiadavky na zníženie množstva emisií skleníkových plynov, tzv. Kjótskym protokolom. Do roku 2020 je tento protokol jediným právne záväzným nástrojom pre zníženie emisií skleníkových plynov na svete. Protokol pokrýva iba asi 12% celosvetových emisií, nakoľko mnoho hlavných producentov emisií nie je jeho súčasťou. V rámci Kjótskeho protokolu boli stanovené dve obdobia záväzkov, počas ktorých sa krajiny zaviazali znížiť množstvo emisií o 5 % v rokoch 2008 - 2012 a o 18 % v rokoch 2013 - 2020. [11]

Parížska dohoda

Parížska dohoda je prvá univerzálna právne záväzná globálna dohoda o klíme, ktorú na konferencii o zmene klímy v Paríži v decembri 2015 prijalo 195 krajín sveta a ktorej hlavným a dlhodobým cieľom je udržať nárast globálnej priemernej teploty výrazne pod 2°C a pokračovať v úsilí na jej obmedzenie na 1,5°C s dosiahnutím klimatickej neutrality do konca storočia. Parížska dohoda vstúpila do platnosti 4. novembra 2016 po tom, ako bola splnená podmienka ratifikovania dohody aspoň 55 krajinami, ktoré dokopy produkujú najmenej 55 % celosvetovej produkcie skleníkových plynov. Krajiny sa zaviazali stretávať sa každých 5 rokov s cieľom stanovovať si neustále ambicioznejšie ciele a podávať správy o plnení týchto cieľov. V popredí medzinárodného úsilia v boji proti klimatickej zmene stojí Európska únia. [12]

2.2 Opatrenia EÚ

Klimatické stratégie a ciele

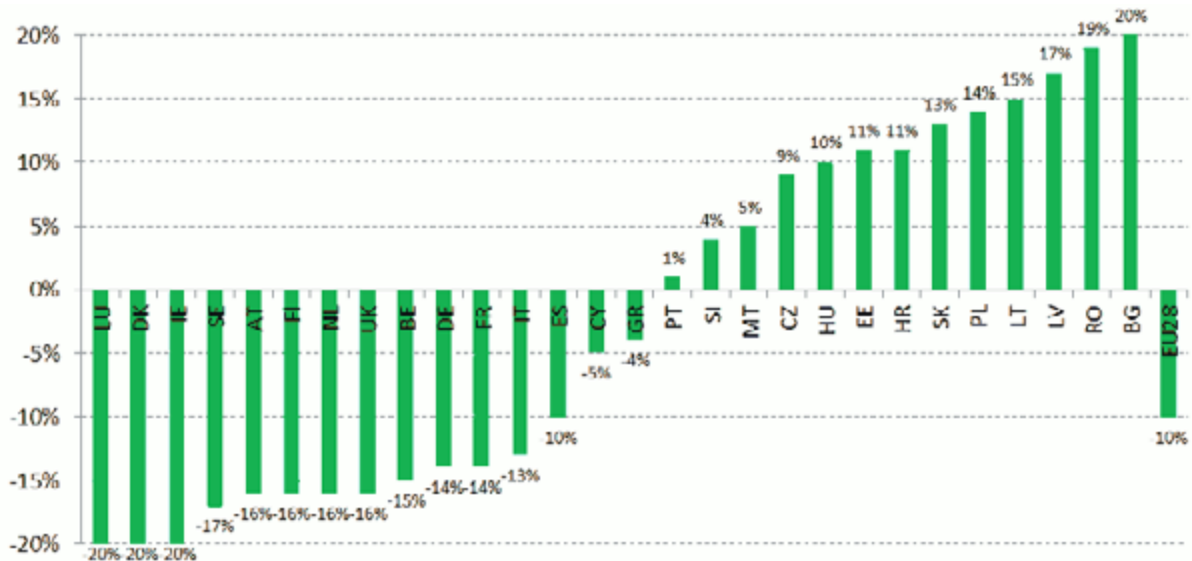
Európska únia si stanovila ciele na postupné znižovanie emisií skleníkových plynov do roku 2050. Európska komisia chce dosiahnuť to, aby Európa dosiahla najneskôr do roku 2050 neutralitu z hľadiska zmeny klímy. 28. septembra 2018 zverejnila komisia strategickú víziu prosperujúcej, modernej, konkurencieschopnej a klimaticky neutrálnej ekonomiky do roku 2050, ktorej hlavným cieľom je udržať globálny nárast teploty výrazne pod 2°C a usilovať sa o to, aby sa tento nárast udržal na 1,5°C. [6]

Európsky systém na obchodovanie s emisiami

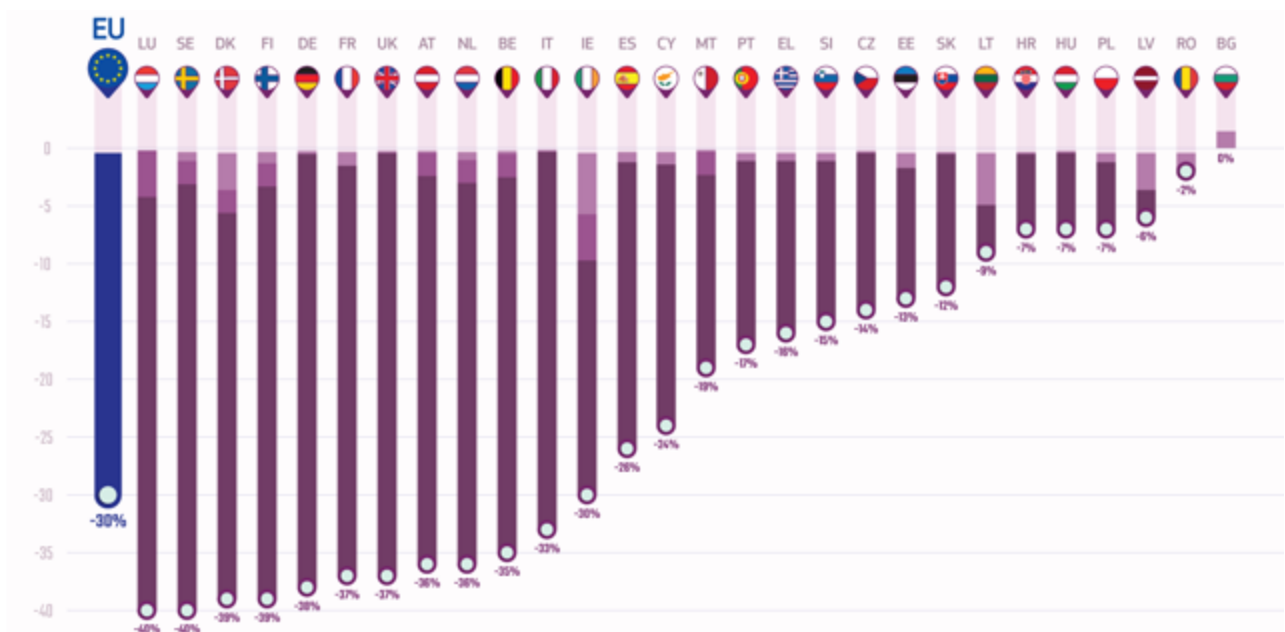
EÚ systém na obchodovanie s emisiami je základným kameňom politiky EÚ v oblasti boja proti klimatickým zmenám a je kľúčovým nástrojom na nákladovo efektívne znižovanie emisií skleníkových plynov. Tento systém stanovuje limit na celkové množstvo určitých skleníkových plynov, ktoré môžu emitovať zariadenia, na ktoré sa systém vzťahuje. Horná hranica sa časom znižuje, takže celkové emisie klesajú. Stanovenie ceny za uhlík a obchodovanie s ním prinieslo v roku 2016 zníženie množstva emisií o viac ako 8% v porovnaní so začiatkom roka 2013 a predpokladá sa, že emisie zo sektorov, na ktoré sa systém vzťahuje budú v roku 2020 o 21% nižšie ako v roku 2005 a v roku 2030 až o 43% nižšie. [8]

Emisné ciele členských štátov

Členské štáty Európskej únie vo svojich právnych predpisoch stanovujú záväzné ročné ciele v oblasti skleníkových plynov pre obdobie 2013-2020 a 2021-2030. Tieto ciele sa týkajú emisií zo sektorov, ktoré nie sú zahrnuté do systému Európskeho systému pre obchodovanie s emisiami, napr. z dopravy, budov, poľnohospodárstva a odpadu. Cieľom je priblížiť Európu nízkouhlíkovému hospodárstvu a zvýšiť jej energetickú bezpečnosť. Ciele jednotlivých štátov majú viesť k zníženiu celkových emisií EÚ do roku 2020 o približne 10 % a do roku 2030 o 30 % v porovnaní s rokom 2005. [7]



Obrázok 5: Emisné limity skleníkových plynov členských štátov EÚ v roku 2020 v porovnaní s úrovňami v roku 2005 [ec.europa.eu]



Obrázok 6: Špecifické ciele zníženia emisií členských štátov EÚ do roku 2030 v porovnaní s rokom 2005 pre odvetvia mimo systému EÚ pre obchodovanie s emisiami [ec.europa.eu]

2.3 Medzivládny panel pre zmenu klímy (IPCC)

V roku 1988 Svetová meteorologická organizácia (WMO – World Meteorological Organization)) a Program OSN pre životné prostredie (UNEP – United Nations Environment Programme) vytvorili Medzinárodný panel pre zmenu klímy (IPCC – The Intergovernmental Panel on Climate Change). IPCC nevykonáva vlastný výskum, ale spolupracuje s tisícami odborníkov z celého sveta, ktorí sa venujú hodnoteniu vedeckých prác o zmenách klímy, pričom nazbierané dáta spracovávajú v tzv. Hodnotiacich správach (AR – Assessment Reports). Cieľom hodnotiacich správ je poskytnúť komplexné a aktuálne vedecké informácie o zmenách klímy, jej dopadoch a rizikách jednotlivým vládam, ktoré ich môžu implementovať do svojich národných programov a zároveň slúžia ako podklad medzinárodných rokovaní o zmene klímy. [13]

2.4 Samit OSN o zmene klímy

23. septembra 2019 sa v New Yorku konal Samit OSN o zmene klímy. Na samite sa stretli vlády, súkromný aj verejný sektor, miestne aj medzinárodné organizácie s cieľom diskutovať a hľadať konkrétne ambiciózne riešenia, ktoré vedú k jasnému cieľu – znížiť emisie skleníkových plynov o 45% v priebehu nasledujúcich 10 rokov a prechod na nulové emisie do roku 2050. Riešená problematika sa týkala globálneho prechodu k obnoviteľným druhom energií, udržateľných infraštruktúr a miest, trvalo udržateľného poľnohospodárstva a správy lesov a oceánov, prispôsobeniu sa vplyvom klímy a zosúladeniu verejných a súkromných financií s nulovou čistotou ekonomikou. [5]

Na samite vystúpili mnohí vplyvní svetoví politici, medzi nimi aj Donald Tusk – predseda Európskej rady, ktorý vo svojom prejave uviedol: „*EÚ už presiahla svoj cieľ zníženia emisií na rok 2020 a presiahne aj svoj cieľ na rok 2030. Očakávame, že namiesto plánovaných 40 % sa emisie skleníkových plynov znížia približne o 45 % v porovnaní s úrovňami z roku 1990. Dôležité je premeniť naše ciele na konkrétne opatrenia, a to je to, čo EÚ robí. Začiatkom budúceho roku Európska únia predloží našim medzinárodným partnerom ambicióznou dlhodobú stratégiu. Som presvedčený, že Európa vyhrá preteky a stane sa prvým klimaticky neutrálnym kontinentom na svete. Cieľ EÚ dosiahnuť do roku 2050 klimatickú neutralitu už schválila veľká väčšina našich členských štátov. A osobne sa domnievam, že je to už len otázka málo času, kým ho neschvália všetky krajiny EÚ.*“

Na samite mala priestor aj súčasná slovenská prezidentka Zuzana Čaputová, ktorá podporuje iniciatívu Európskej únie urobiť z Európy prvý uhlíkovo neutrálny kontinent na svete a vo svojom prejave vyzvala na globálnu zmenu spôsobu života.

3. Záver

Klimatické zmeny sú vysoko aktuálny a celosvetovo diskutovaný problém, ktorý vo väčšej alebo menšej miere ovplyvňuje každú krajinu sveta. Narúša národné hospodárstva a ovplyvňuje životy, pričom najchudobnejšie krajiny sú tými najzraniteľnejšími, preto je nevyhnutné prijať naliehavé opatrenia na boj proti zmene klímy. Klimatické zmeny sú globálnou výzvou, ktorá vyžaduje riešenia, ktoré je potrebné koordinovať na medzinárodnej úrovni, aby sa všetky krajiny sveta, vrátane rozvojových, mohli obrátiť na energiu z obnoviteľných zdrojov a celý rad ďalších opatrení, ktoré znížia emisie a zvýšia úsilie, ktorého výsledkom bude nízkouhlíkové hospodárstvo na celom svete.

Zdroje

- [1] Acciona. *Causes of climate change*. [online]. Získané z <<https://www.acciona.com/climate-change/>>
- [2] Acciona. *Observed and expected environmental effects*. [online]. Získané z <<https://www.acciona.com/climate-change/>>
- [3] Acciona. *What is climate change?*. [online]. Získané z <<https://www.acciona.com/climate-change/>>
- [4] Acciona. *When did humans first begin to cause climate change?*. [online]. Získané z <<https://www.acciona.com/climate-change/>>
- [5] Climate action summit 2019. *UN Climate Action Summit 2019*. [online]. Získané z <<https://www.un.org/en/climatechange/un-climate-summit-2019.shtml>>
- [6] European Commission. *2050 long-term strategy*. [online]. Získané dňa 30.9.2019 z <https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en>
- [7] European Commission. *Effort sharing: Member States' emission targets*. [online]. Získané dňa 30.9.2019 z <https://ec.europa.eu/clima/policies/effort_en>
- [8] European Commission. *EU Emissions Trading System (EU ETS)*. [online]. Získané dňa 30.9.2019 z <https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en>
- [9] European Commission. *Causes of climate change*. [online]. Získané z <https://ec.europa.eu/clima/change/causes_en>
- [10] European Commission. *Climate change consequences*. [online]. Získané z <https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_en>
- [11] European Commission. *Climate negotiations*. [online]. Získané dňa 30.9.2019 z <https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations_en>
- [12] European Commission. *Paris Agreement*. [online]. Získané dňa 30.9.2019 z <https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en>
- [13] IPCC. *About the IPCC*. [online]. Získané z <<https://www.ipcc.ch/about/>>
- [14] NASA Global Climate Change. *The Causes of Climate Change*. [online]. Získané z <<https://climate.nasa.gov/causes/>>
- [15] NASA Global Climate Change. *The Causes of Climate Change. The Role of Human Activity*. [online]. Získané z <<https://climate.nasa.gov/causes/>>
- [16] NASA Global Climate Change. *Climate Change: How Do We Know*. [online]. Získané z <<https://climate.nasa.gov/evidence/>>

Jozef Kováč¹

Študijný program: teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník: 3.

MECHANICKÉ VLASTNOSTI FÓLIOVÝCH POVLAKOVÝCH HYDROIZOLAČNÝCH MATERIÁLOV NA BÁZE MPVC

MECHANICAL PROPERTIES OF PVC-P WATERPROOFING MATERIALS

Abstract

The subject of the article is physic-mechanical analysis of coating waterproofing materials exposed to the environment over time. The physic-mechanical properties have a direct impact on the service life of the waterproofing materials and their later remediation. Based on generally known information in our market, the use of PVC-P (mPVC) based foils predominates and it is therefore necessary to address this issue in terms of their lifetime. Subsequently, we deal with normative testing of coating waterproofing in terms of their strength. What can have a direct effect with volume changes and anchoring system waterproofing.

1. Úvod

Jeden z najväčších rozvojev plastov nastal v stavebnom priemysle. Polymérne výrobky sa v stavebníctve využívajú na výrobu okenných profilov, tepelnej, hlukovej izolácie a najviac k výrobe povlakových hydroizolácii. Keďže plasty v stavebníctve nepatria medzi spotrebný materiál musia vykazovať dlhú životnosť a zachovanie svojich vlastností - mechanickú odolnosť voči rôznym poveternostným a teplotným podmienkam. Článok a výskum sa zaoberá problematikou testovania mechanických vlastností hydroizolačných materiálov.

2. Štruktúra a chemické zloženie hydroizolačnej fólie na báze mPVC

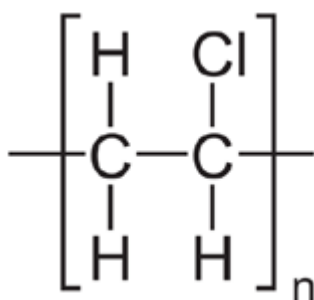
Polyvinylchlorid je jedným z najdôležitejších termoplastov. Má množstvo výhodných vlastností a relatívne nízku cenu. Žiadny polymér nemá, tak široké možnosti použitia. Jeho podiel na celkovej výrobe plastov sa v jednotlivých technicky vyspelých štátoch pohybuje od 13 do 22%. Svetová produkcia PVC je v súčasnosti 43,6 miliónov ton za rok a neustále rastie. Z pôvodnej produkcie 24,7 miliónov ton v roku 2000 sa v roku 2020 očakáva nárast produkcie na 55,2 miliónov ton [1].

Polyvinylchlorid nie je rozpustný vo vode, v olejoch ani v koncentrovaných anorganických kyselinách a zásadách. Vyznačuje sa schopnosťou želatinácie s rôznymi zmäkčovadlami, značnou chemickou, biologickou a dobrou tepelnou odolnosťou. Mechanické vlastnosti, svetelnú, poveternostnú odolnosť, farbu a elektrické vlastností výrobku ovplyvňujú rôzne prímеси, predovšetkým zmäkčovadlá. Mäkčené PVC máva zložité receptúry a nízku odolnosť voči chlórovaným organickým rozpúšťadlám a ketónom, ale vyznačuje sa dobrou spracovateľnosťou (nižšou viskozitou taveniny), dobrou odolnosťou za nízkych teplôt (pod 0 °C), bezproblémovou lepiivosťou, výrobnými optickými vlastnosťami a širokou škálou tvrdosti.

¹ Jozef Kováč, Ing., Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta, Katedra konštrukcií pozemných stavieb, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Výroba základného vinylchloridu je pomerne jednoduchá a lacná. V súčasnej dobe sa vinylchlorid priemyselne vyrába z kamennej soli (NaCl) a etylénu vyrobeného z ropy alebo prírodného etylalkoholu. Z kamennej soli sa získava chlór elektrolyzou alkalických chloridov, teda technickým rozkladom vodného roztoku soli pomocou elektrickej energie. Popritom sa vytvorí hydroxid sodný, chlór a vodík v nezmeniteľnom pomere množstva. Etylén a chlór vytvoria 1,2 – dichlóretán a z neho vzniká v ďalšom stupni reakcie vinylchlorid. Vinylchlorid potom polymerizuje na polyvinylchlorid. Samotný polymér sa mieša s rôznymi prísadami, ktoré zlepšujú jeho vlastnosti. Týmito prísadami sú predovšetkým plnivá, stabilizátory (na zvýšenie tepelnej stability a odolnosti voči ultrafialovému i tepelnému žiareniu), zmäkčovadlá (pre lepšiu manipuláciu) a mazivá (pre lepšiu spracovateľnosť). Ako stabilizátory sa v minulosti požívali aj ťažké kovy (kadmium, olovo), či organické zlúčeniny cínu, ale väčšinou sú už nahradené prísadami na báze ekologického vápnika. Ako zmäkčovadlá sa spravidla používajú ftaláty. Polyméry PVC je možné spracovať prakticky všetkými základnými postupmi, ako je valcovanie, vytlačanie, vstrekovanie, vyfukovanie alebo vákuové tvarovanie, [2].

PVC má široké spektrum využitia. Výrobky z PVC môžu byť tuhé (ohybné), farebné (priehľadné), izolanty (vodiče). PVC sa často používa v stavebníctve, kde nahrádza tradičné stavebné materiály ako drevo, betón, hlinu. PVC má totiž prakticky ideálne stavebné vlastnosti. Je to ľahko opracovateľný (pri veľmi vysokých aj nízkych teplotách (50 °C až -20 °C)) a pritom odolný materiál, ktorý sa používa pri výrobe odpadového potrubia, okenných a dverných rámov. Mäkčené PVC sa používa pri výrobe polotuhých až elastických výrobkov, ako sú strešné fólie, podlahové krytiny. Praxou overená životnosť sa uvádza minimálne na 25 rokov, [3].



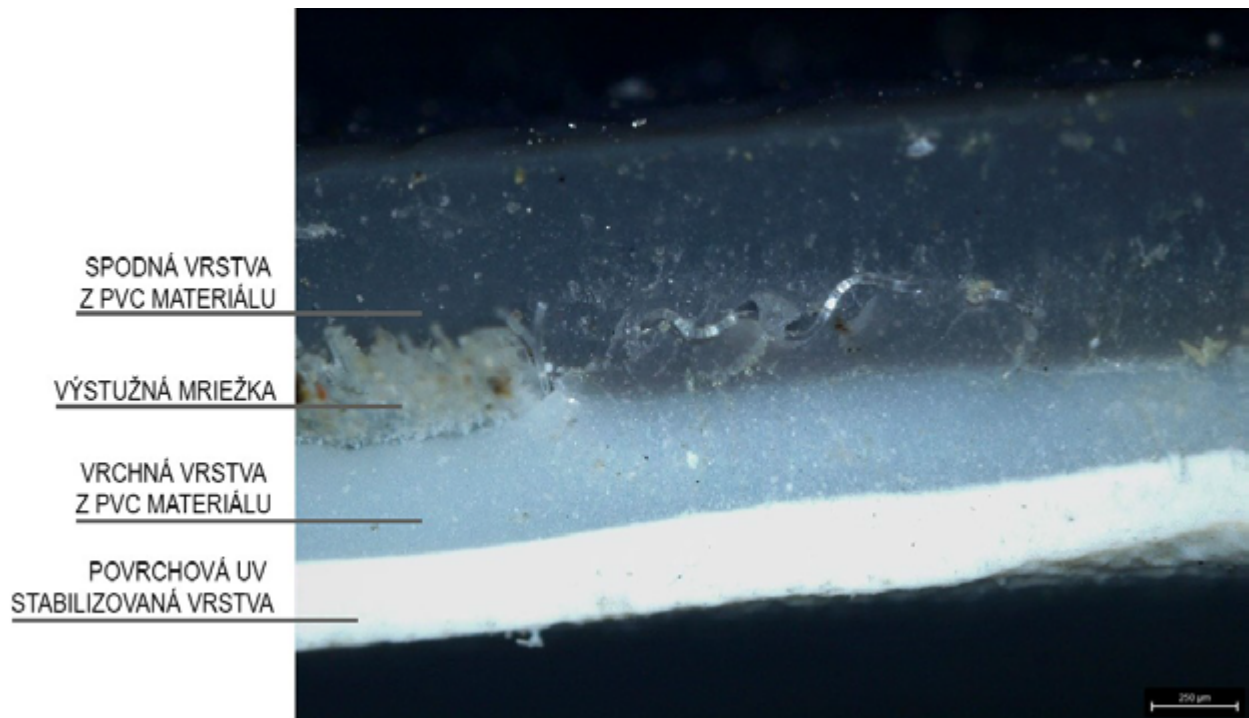
Obr. 1 Chemický vzorec polyvinylchloridu (PVC)

Výhody mPVC

- veľmi dobrá odolnosť voči poveternostným vplyvom
- veľmi dobrá chemická odolnosť voči agresívnym vplyvom ovzdušia
- minimálne príťaženie nosnej konštrukcie strechy
- hygienická a ekologická nezávadnosť
- ekonomicky výhodné

Nevýhody mPVC

- slabá odolnosť voči prerazeniu
- nie je kompatibilná s polystyrénom EPS



Obr. 2 Snímka z mikroskopu Leica DVM 6. Vzorka - mPVC s výstužnou vložkou

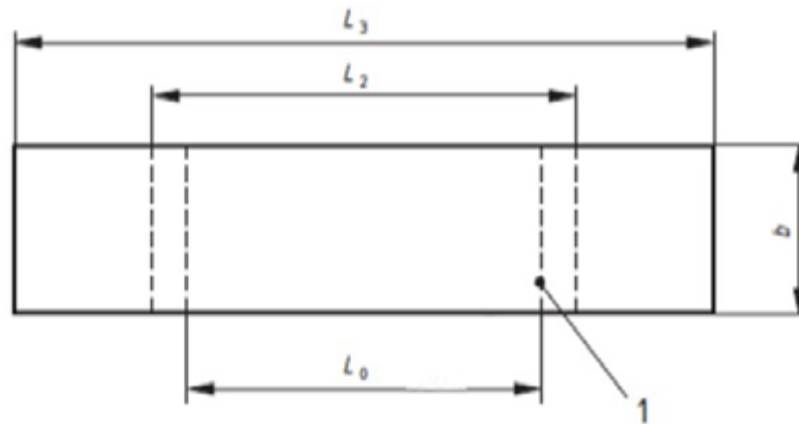
3. Testovanie pevnostných vlastností

3.1 Metodika merania podľa STN EN 12311-2

Skúšobná vzorka je ťahaná pri konštantnej rýchlosti až do jej pretrhnutia. Počas skúšky sa priebežne zaznamenáva ťahová sila a zodpovedajúce predĺženie skúšobnej vzorky, najlepšie za stáleho zaznamenávania najvyššej hodnoty.

Postup merania: skúšobné teleso sa pevne zovrie v čelustiach trhacieho stroja, pričom sa musí dbať aby pozdĺžne osi telies a osi čelustí boli rovnobežné. Pred začiatkom skúšky sa odporúča použiť predpätie najviac 5 N na napnutie skúšobného telesa. Skúška sa vykoná na skúšobnom telese pri teplote (23 ± 2) °C. Musí sa použiť konštantná rýchlosť čelustí (100 ± 10) mm/min s týmito výnimkami: pre výrobky s deklarovanou hodnotou pre predĺženia viac ako 400% sa musí použiť konštantná rýchlosť čelustí 500 mm/min; Youngov modul, ktorý je definovaný ako sečnicový modul pri predĺžení od 1% do 2%, sa musí určiť ako sečnica krivky napätie – deformácia pri použití rýchlosti (5 ± 1) mm/min, [4].

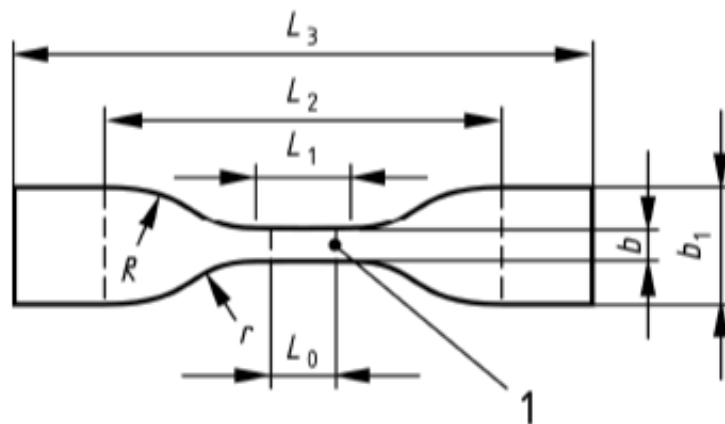
Použitá ťahová sila a vzdialenosť medzi čelusťami, alebo vzdialenosť kontrolných značiek pre skúšobné teleso sa musia zaznamenávať až do pretrhnutia. V prípade pásov s kompozitnými nosnými vložkami, ktoré pri skúške dávajú dva alebo viac zreteľných vrcholov na krivke sily/predĺženia, sa zaznamenáva sila a ťažnosť pri dvoch najvyšších vrcholoch, [4].



Legenda

1 kontrolná značka

Obr. 3 Pravoúhlé skúšobné teleso pre metódu A [4]



Legenda

1 kontrolná značka

Obr. 4 Skúšobné teleso činkovitého tvaru pre metódu B [4]

Protokol o skúške musí obsahovať nasledovné údaje:

- Odkaz na európsku normu (EN 12311-2) a na všetky odchýlky od nej
- Všetky údaje potrebné na identifikáciu skúšobného výrobku
- Informácie o odbere vzoriek podľa EN 13416
- Údaje o príprave skúšobných telies
- Výsledky skúšky, so záznamom rýchlosti čel'ustí a uvedenia, či vzdialenosť medzi čel'ust'ami bola zmenšená
- Všetky neštandardné postupy v použítom postupe, alebo vyskytujúce sa počas skúšky
- Dátum a čas skúšky

3.2 Laboratórne vybavenie

Testovanie prebehlo a bude prebiehať v Laboratóriu pre výskum striech na Stavebnej fakulte Slovenskej technickej univerzity v Bratislave. Laboratórium disponuje prístrojmi pre príslušné meranie základných charakteristík materiálov (hmotnosť, rozmery), prístrojmi simulujúcimi vonkajšie podmienky a prístrojom pre zhotovovanie mechanickej odolnosti materiálov.

Trhací prístroj M500-25CT – 20kN s klimakomorou TH2700

M500-25CT je stolový dvojstĺpový, počítačom riadený univerzálny skúšobný prístroj pre skúšanie materiálov v ťahu, tlaku, ohybe, cyklickom namáhaní, šmyku a tvrdosti. Prístrojom je možné testovať mechanické vlastnosti stavebných materiálov a ich spojov pri záporných a kladných teplotách. Prístroj je riadený pomocou software *winTest™ Analysis*.

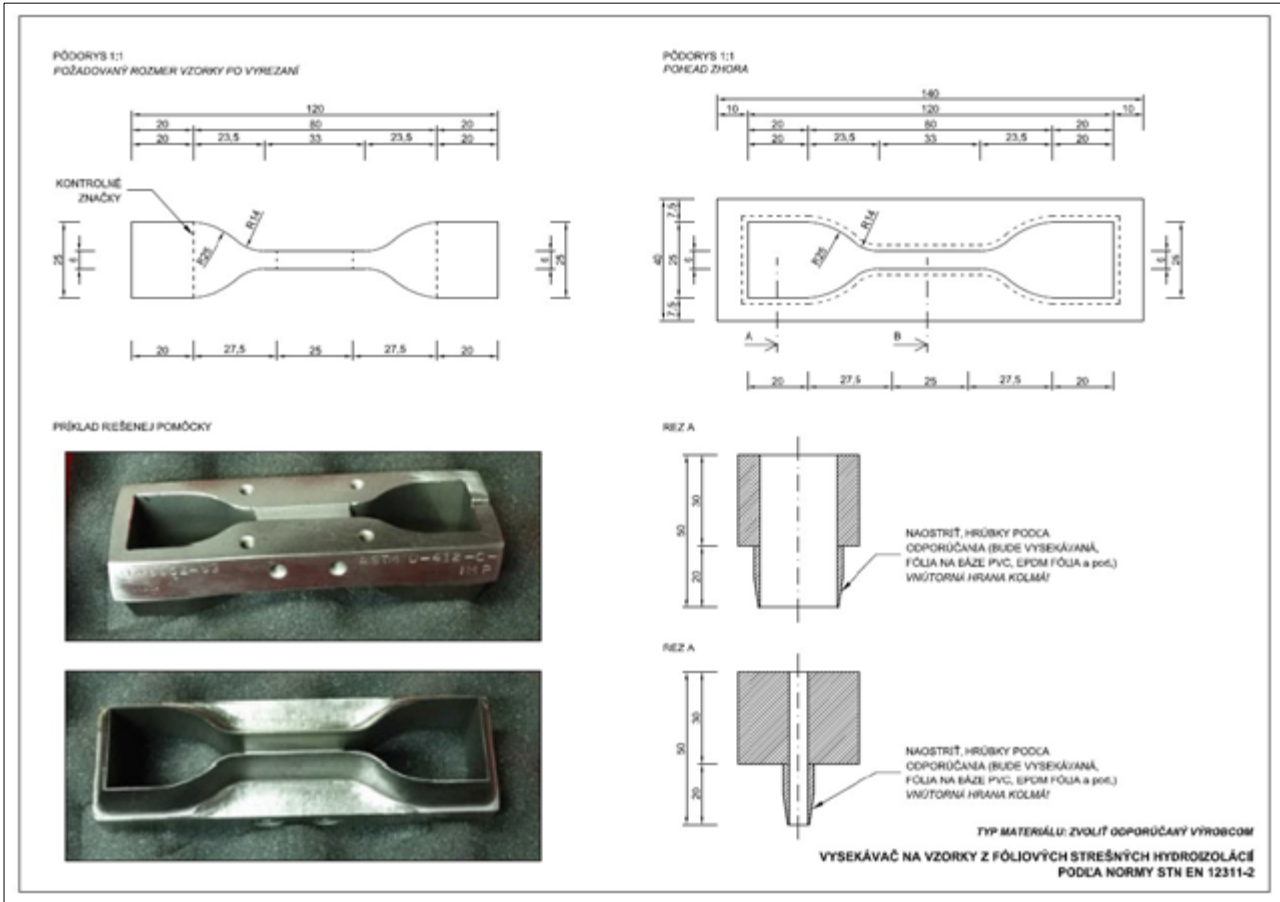


Obr. 5 Trhací prístroj M500-25 CT s klimakomorou TH2700 (vľavo, stred); Nádoba na kvapalnú dusík Cryotherm 50L (vpravo)

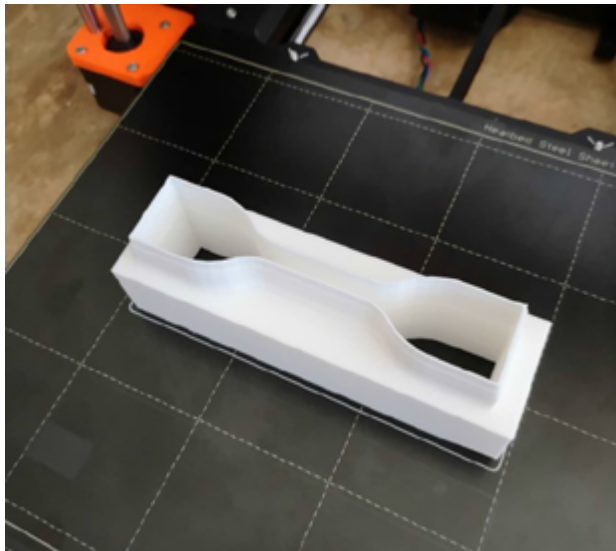
Trhací prístroj je vybavený dodatočným vybavením – klimakomorou TH2700. Je to komora z nehrdzavejúcej ocele. Špeciálne bezpečnostné dvierka s preskleným otvorom zo 4-skla. Hrúbka steny je 70 mm. Teploty sú regulované pomocou riadiacej jednotky – *Digitálny regulátor teploty – E5AN (Grip, 2018)*. Míňusové teploty sú dosahované vďaka kvapalnému dusíku, ktorý je skladovaný v špeciálnej nádobe *Cryotherm 50L*. Rozsah prevádzkových teplôt sa pohybuje v rozmedzí od -70°C do 280°C.

Oceľová raznica

Oceľová raznica bola vyrobená podľa normy STN 12311-2. Skúšobné teleso spĺňa rozmery činkovitého tvaru pre metódu B.



Obr. 6 Výrobný výkres pre dodávateľa raznice



Obr. 7 Model raznice z 3D tlačiarne (vľavo), hotový výrobok (vpravo)

4. Príprava experimentu

4.1 Skúšobné normy

STN EN 12311-2 – Hydroizolačné pásy a fólie. Stanovenie ťahových vlastností. Časť 2: Plastové a gumové pásy a fólie na hydroizoláciu striech

4.2 Príprava vzoriek

Vzorky boli pripravené za pomoci kovovej raznice a hydraulického lisu.
Typy vzoriek – 2x mPVC s výstužnou mriežkou, 1x mPVC bez výstužnej mriežky



Obr. 8 Vzorky mPVC a kovová raznica

4.3 Priebeh experimentu

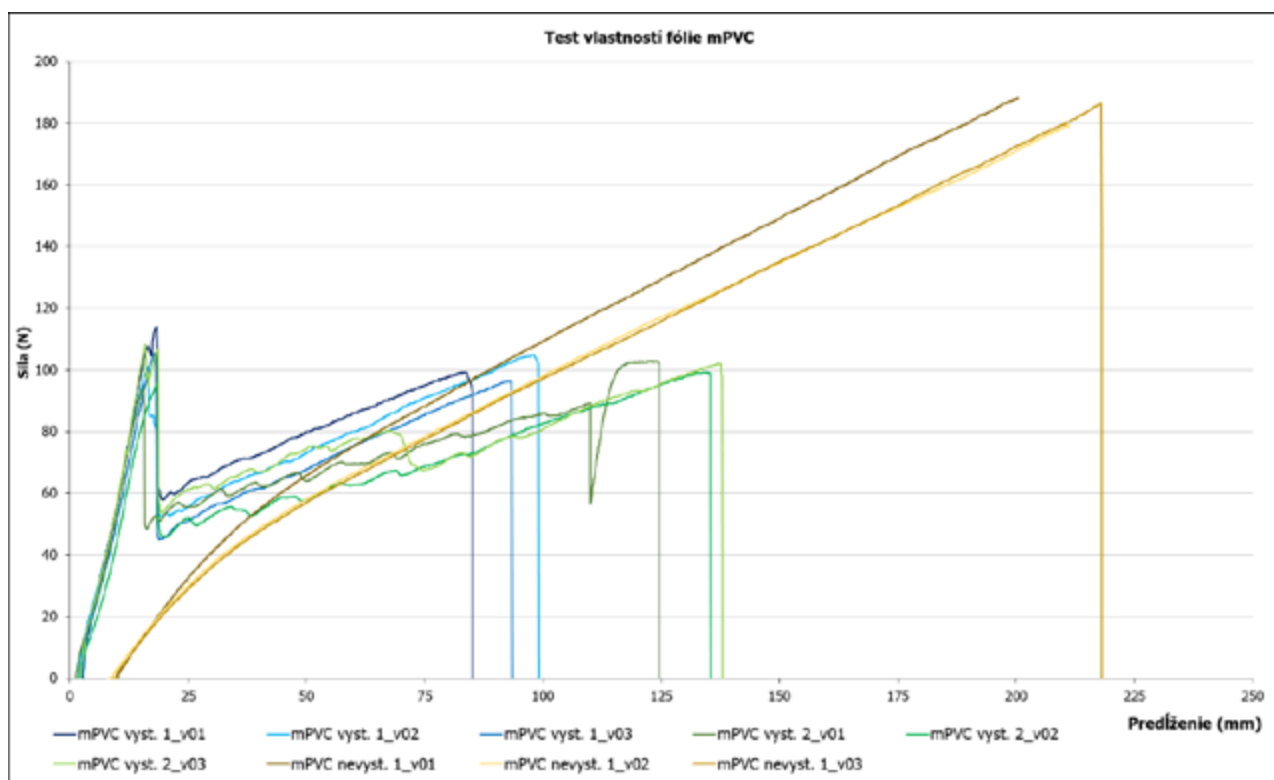
Pevnostná skúška bola zrealizovaná pri bežnej teplote 20°C. Pre správnosť testu bola trhová skúška vykonaná na troch vzorkách.



Obr. 9 Vzorky mPVC po trhacom teste

5. Vyhodnotenie

V experimente boli testované tri typy hydroizolačných fólií na báze mPVC. Dva typy (zelená a modrá farba) boli mPVC fólie s výstužnou mriežkou, kde je možné sledovať prudký nárast pevnosti a následný pád. Tento jav je dôsledok pretrhnutia výstužnej mriežky. Taktiež vidíme, že použité súbory vzoriek mPVC vyst.2 má priaznivejšie pevnostné vlastnosti ako mPVC vyst.1. Následné ďalší skok v grafe znázorňuje pretrhnutie všetkých vrstiev. Nevystužené vzorky mPVC (mPVC nevyst.1) im pevnosť lineárne narastá, vzhľadom na absenciu výstužnej mriežky vidíme čistý priebeh. Spomínaná hydroizolácia sa používa pri realizácii detailov stavby, takže pevnostné vlastnosti musí spĺňať dôraznejšie ako mPVC s výstužnou mriežkou, keďže umiestnenie bez výstužnej mriežky je v kriticky namáhaných detailoch.



Obr. 10 Priebeh pevností hydroizolačných materiálov na báze mPVC

6. Záver

V článku som sa zaoberal pevnostnými vlastnosťami hydroizolačných fólií na báze mPVC. Venoval som sa metodike testovania materiálov. Vzhľadom k naštudovanej problematike a testovacej normy, je vhodné do budúcnosti sa zaoberať samotnou metodikou testovania a preveriť respektíve navrhnúť jej úpravu. Jedným z bodov, ktorým je nutné sa ďalej venovať je tvar prípadne rozmery skúšobných vzoriek. Chceli by sme preveriť, aký vplyv má na výsledky skúšobná vzorka, ktorá bude vyseknutá rovnobežne, kolmo a diagonálne na vlákna. Keďže testovacia raznica má v úzkom bode šírku len 6 mm, treba dbať na to, aby skúšobné vzorky mali mať v svojom reze rovnaký počet vlákien, pretože to môže byť dôsledok, rôzneho pevnostného priebehu. Následne prebehne aj experiment v súčinnosti na teplotu vzorky a aj porovnanie vzoriek UV degradovaných voči novým vzorkám.

PodĎakovanie

Tento výskum bol podporený projektom Mladý výskumník 2019, pod č. 1602.

Literatúra

- [1] Research and Markets, Polyvinyl Chloride (PVC) Global Supply Dynamics to 2020 - China Emerges as the Leader in Global Production. [online]. [cit. 20.12.2018]. Dostupné z: <http://www.businesswire.com/news/home/20110110006117/en/ResearchMarkets-Polyvinyl-Chloride-PVC-Global-Supply>
- [2] Běhalálek L., Polymery. Code Creator, s.r.o, 2016. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
- [3] Lederer J.. Polyamidy, Katedra chémie, UJEP [online]. [cit. 20.12.2018]. Dostupné z: <http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/PVC07022013.pdf>
- [4] STN EN 12311-2 – Hydroizolačné pásy a fólie. Stanovenie ťahových vlastností. Časť 2: Plastové a gumové pásy a fólie na hydroizoláciu striech

Barbora Kráľová¹

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, 1. ročník

PREHĽAD UDRŽATEĽNÝCH TEPELNOIZOLAČNÝCH MATERIÁLOV BUDOV

AN OVERVIEW OF SUSTAINABLE THERMAL BUILDING INSULATION MATERIALS

Abstract

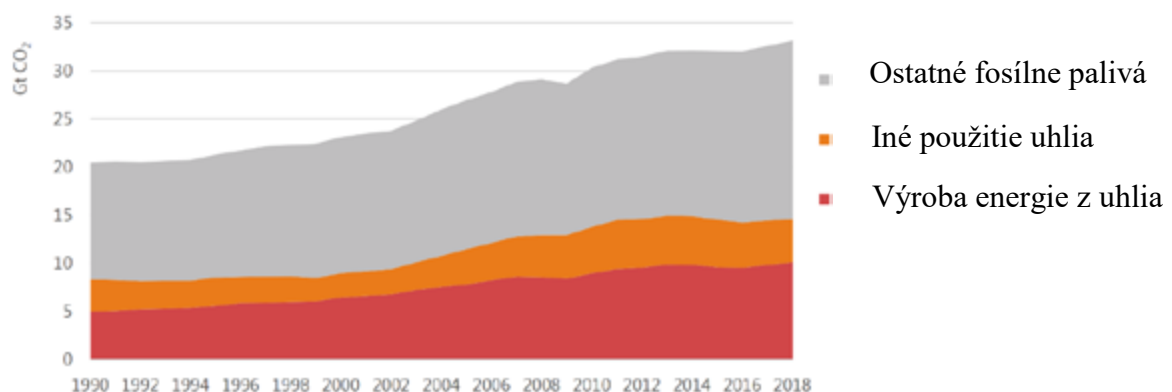
Energy saving has become a global strategic goal leading to the protection of natural resources and the environment. One of the most important changes is to reduce the energy consumption of buildings during all phases of their life cycle. Strategies for reducing energy needs for heating and cooling buildings should not only focus on improving the efficiency of appliances, but also on optimizing building envelope properties. The aim of the article is to clarify sustainable thermal insulation materials which may contribute to reducing energy consumption and the amount of emissions CO₂.

Kľúčové slová

tepelnizolačné materiály, súčiniteľ tepelnej vodivosti, životný cyklus, CO₂, energia.

1. Úvod

Rast globálnej spotreby energie sa od roku 2010 do roku 2018 takmer zdvojnásobil najmä následkom silnej globálnej ekonomiky a vyšších požiadaviek na vykurovanie a chladenie budov. Emisie CO₂ vzrástli o 1,7% na historické maximum 33,1Gt CO₂ [1].



Obr. 1: Globálne emisie CO₂ rozdelené podľa zdroja energie. [1]

Budovy predstavujú spotrebu približne 36% globálnej energie a takmer 40% produkcie emisií CO₂. Potreba energie budov neustále stúpa v dôsledku jednoduchšej prístupnosti energií v rozvojových krajinách, väčšieho vlastníctva, používania zariadení spotrebujúcich energiu a narastania podlahovej plochy [2].

¹ Barbora Kráľová, Ing., Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta, Katedra konštrukcií pozemných stavieb, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Úspora energie sa stala celosvetovo strategickým cieľom vedúcim k ochrane prírodných zdrojov a životného prostredia. Jednou z najdôležitejších zmien je znížiť spotrebu energie budov počas všetkých fáz ich životného cyklu. Stratégie znižovania potreby energie na vykurovanie a chladenie budov by sa nemali zameriavať len na zlepšenie účinnosti spotrebičov (pasívne opatrenie) a správania sa užívateľov budov, ale aj na optimalizovanie vlastností obálok budov (aktívne opatrenie) [3] [4]. Použitie tepelnej izolácie budov znižuje energetické straty budov počas celého roka maximalizovaním efektívnosti chladiaceho a vykurovacieho systému, ako aj znížením potreby elektrickej energie na vykurovanie a chladenie a redukovaním vstupných nákladov chladiaceho a vykurovacieho systému. Okrem vytvorenia komfortnej mikroklímy priestoru sa úspora elektrickej energie pozitívne prejaví vzhľadom k životnému prostrediu redukovaním emisií CO₂ [5].

Konvenčne využívané tepelné izolácie budov často obsahujú petrochemikálie alebo sa vyrábajú a likvidujú energeticky náročným procesom [3]. Hoci používané tepelné izolácie dosahujú relatívne uspokojivé tepelnotechnické a mechanické vlastnosti, je potrebné zamerať sa na aspekt dopadu ich životného cyklu na životné prostredie a zdravie človeka. Cieľom článku je priblížiť vo svete skúmané tepelné izolácie na prírodnej a recyklovanej báze, ktoré by sa podieľali na znižovaní spotreby energie a množstve emisií CO₂.

2. Tepelnoizolačné a environmentálne charakteristiky materiálov a konštrukcií

2.1 Tepelnoizolačné charakteristiky

Medzi základné tepelnotechnické ukazovatele stavebných látok patrí tepelná vodivosť vyjadrujúca schopnosť látky vo väčšej alebo menšej miere prenášať teplo vedením počas ustáleného teplotného stavu. Tepelná vodivosť je charakterizovaná súčiniteľom tepelnej vodivosti λ vo W/(m.K) [6]. Materiál so súčiniteľom tepelnej vodivosti menej ako 0,07 W/(m.K) sa zvyčajne považuje za tepelný izolant [3].

Dôležitou veličinou pri posudzovaní tepelných strát budov je súčiniteľ prechodu tepla. Súčiniteľ prechodu tepla U vo W/(m²K) udáva tepelný tok šíriaci sa z vnútorného do vonkajšieho prostredia cez 1 m² konštrukcie pri jednotkovom rozdieli teploty vnútorného a vonkajšieho prostredia [6]. Tepelný odpor konštrukcie R v m²K/W je obrátenou hodnotou plošnej tepelnej priepustnosti konštrukcie a vyjadruje tepelnoizolačné vlastnosti konštrukcie [7].

2.2 Environmentálne charakteristiky

Metodológia hodnotenia environmentálneho dopadu produktov a služieb na životné prostredie a ľudské zdravie je hodnotená počas celej ich životnosti. Tento prístup sa tiež označuje ako „od kolísky po hrob“ (CTGR²) kvôli posudzovaniu od ťažby suroviny po jej zneškodnenie. Druhý prístup „od kolísky po bránu“ (CTGA³) je používaný pre hodnotenie končiace pred fázou transportu produktu zákazníkovi. Hodnotenie tepelnoizolačných materiálov je kvantifikované množstvom materiálu dosahujúceho tepelný odpor 1 m²K/W. Environmentálna záťaž je meraná definovanými indikátormi kumulovanej požadovanej energie (CED⁴) a potenciálom globálneho otepľovania (IPPC⁵ GWP 2007). Prvý parameter, meraný v MJ na funkčnú jednotku (f.j.), určuje primárnu energiu spotrebovanú počas celého životného cyklu. Druhý parameter je indikátorom množstva skleníkových

² Od kolísky po hrob (angl. Cradle to grave, skratka CTGR)

³ Od kolísky po bránu (angl. Cradle to gate, skratka CTGA)

⁴ Kumulovaná požadovaná energia (angl. Cumulative Energy Demand, skratka CED)

⁵ Medzivládny panel o zmene klímy (angl. Intergovernmental Panel on Climate Change, skratka IPCC)

plynov v kg na funkčnú jednotku materiálu počas jeho životného cyklu. Korektná LCA⁶ analýza je vykonávaná v zhode s normami ISO 14040 a ISO 14044 [8] [9].

3. Porovnanie udržateľných tepelnoizolačných materiálov z hľadiska tepelnej charakteristiky

Hoci sa množstvo tepelnoizolačných materiálov komerčne používa, tieto stavebné materiály čelia rôznym ťažkostiam a výzvam, akými sú cena, tepelnotechnické a mechanické vlastnosti, zdravotné problémy užívateľov budov atď. Hoci súčasné izolačné materiály na báze polymérov (polystyrén, polyuretán) ale aj prírodných zdrojov (minerálna vlna) dosahujú vysoké tepelnoizolačné vlastnosti, ich dopad na životné prostredie je enormný. V súčasnosti je nutné vyvíjať materiály, ktoré pri rovnako optimálnych tepelnoizolačných vlastnostiach vykazujú nízky dopad na životné prostredie a ich cena je nižšia [5]. Udržateľnosť izolačných materiálov je úzko prepojená s ich dostupnosťou a teda používané by mali byť tam, kde sú vypestované alebo vyrobené [3]. Prehľad je zameraný najmä na tepelnoizolačné a environmentálne vlastnosti materiálov.

3.1 Tepelné izolácie na báze prírodných materiálov

Zvyšky cukrovej trstiny sú považované za odpad pri výrobe cukru, takže ich udržateľnosť v oblastiach vyrábajúcich cukor je vysoká. Najväčšia produkcia cukru je v Amerike a Ázii. Okrem nízkej ceny je pozitívom ich obsah celulózy a znižovanie používania syntetických spojív. Najlepšie dosiahnuté hodnoty súčiniteľa tepelnej vodivosti sa pohybujú v rozmedzí 0,046 až 0,055 W/(mK) pri hustote 100 až 350 kg/m³.

Kukurličné klasy ako odpad z pestovania kukurice po zmiešaní s celulórou dosahujú hodnoty súčiniteľa tepelnej vodivosti 0,101 W/(mK). Treťou najprodukovanejšou plodinou vo svete po kukurici a cukrovej trstine je ryža. Tepelnoizolačný panel zo šupiek ryže vykazuje súčiniteľ tepelnej vodivosti medzi 0,0464 a 0,0566 W/(mK).

Rákosie ako tepelný izolant nie je úplne nekonvenčným materiálom keďže je využívaným na zateplenie v niektorých častiach Východnej Európy. Súčiniteľ tepelnej vodivosti panelov vyrobených z rákosia dosahuje hodnoty 0,045 až 0,056 W/(mK) pri hustote 130 až 190 kg/m³.

Pálky sú považované za rýchlorastúcu burinu ohrozujúcu pestované plodiny najmä v juhovýchodnej Ázii a severnej Amerike. Ich vlákna po spojení s metylén difenyl izokyanátom dosahujú súčiniteľ tepelnej vodivosti 0,0438 až 0,0606 W/(mK) pri hustote tepelnoizolačného panelu 200 až 400 kg/m³ [3].

Konope je textilným vláknom, ktoré po zmiešaní so spojivom dokáže dosahovať hodnotu súčiniteľa tepelnej vodivosti 0,039 W/(mK). Materiály na báze konope, tak ako aj iné prírodné materiály majú tendenciu absorbovať množstvo vody zo vzduchu, kým ich tepelnoizolačné vlastnosti sa znižujú [10].

Z výroby bavlny sa produkuje odpad zo stoniek bavlníka, ktoré ako vlákna nemusia byť miešané s chemickými spojivami a ich súčiniteľ tepelnej vodivosti sa pohybuje od 0,0585 do 0,0815 W/(mK). Najväčšia produkcia bavlny je v Ázii a Amerike [3].

Tepelná izolácia z ľanových vlákien s hustotou 20 až 100 kg/m³ vykazuje súčiniteľ tepelnej vodivosti 0,038 až 0,075 W/(mK).

Hustota tepelných izolantov z ovčej vlny so súčiniteľom tepelnej vodivosti 0,038 až 0,054 W/(mK) sa pohybuje v rozmedzí 10 až 25 kg/m³ [10].

Hodnoty súčiniteľov tepelnej vodivosti sú uvedené v Tab. 2 pre spomenuté materiály, ako aj pre palmu datľovú, durian, olej z palmových vlákien, ananásové listy, vlákna rastliny Sansevierie

⁶ Analýza životného cyklu výrobkov (angl. Life Cycle Assessment, skratka LCA)

roxburghian, kompozitov slnečnice, balíky slamy atď. Tab. 1 uvádza vlastnosti konvenčných tepelných izolantov pre porovnanie.

3.2 Recyklované materiály

Recyklovanie syntetických materiálov a používanie vedľajších priemyselných produktov môže byť udržateľnou stratégiou znižovania výroby materiálov z čistých surovín a ukladania odpadu na skládky.

Polyetylén tereftalát (PET) je jedným z najprodukovanejších plastov používaných na baliace účely. Recyklované PET fľaše (75%) a špeciálny tepelnoizolačný PET materiál (25%) boli použité na výrobu tepelnoizolačných panelov, ktoré dosahovali súčiniteľ tepelnej vodivosti 0,0355 W/(mK) pri hustote 30 kg/m³.

Recyklované vlákna bavlny a džínsoviny dosahujú hodnoty súčiniteľa tepelnej vodivosti 0,039 až 0,044 W/(mK) pri relatívne nízkej hustote 25 až 45 kg/m³.

Textilná výroba súčasnosti produkuje veľké množstvo odpadu končiaceho najmä na skládkach. Recyklovaním syntetických zvyškov textilu obsahujúceho polyester a polyuretán boli vytvorené testované vzorky so súčiniteľom tepelnej vodivosti 0,041 až 0,053 W/(mK) pri hustote 396 kg/m³. Tepelnoizlačné vlastnosti recyklovaných materiálov sa nachádzajú v Tab. 3.

Zelená farba v tabuľkách označuje materiály so súčiniteľom tepelnej vodivosti $\lambda < 0,05$ W/(m.K), žltá materiály so súčiniteľom tepelnej vodivosti $0,05$ W/(m.K) $\leq \lambda \leq 0,08$ W/(m.K) a červená farba materiály s $\lambda > 0,08$ W/(m.K) [3].

Tab. 1: Vlastnosti niektorých konvenčných tepelných izolantov [3]

| Materiál | Hustota | Súčiniteľ tepelnej vodivosti |
|------------------------|----------------------|------------------------------|
| | [kg/m ³] | [W/(mK)] |
| Kamenná vlna | 40 - 200 | 0,033 – 0,040 |
| Expandovaný polystyrén | 15 - 35 | 0,031 – 0,038 |
| Extrudovaný polystyrén | 32 - 40 | 0,032 – 0,037 |
| Kenaf | 30 - 180 | 0,034 – 0,043 |
| Ovčia vlna | 10 - 25 | 0,038 – 0,054 |

Tab. 2: Vlastnosti niektorých prírodných tepelných izolantov [3]

| Materiál | Hustota | Súčiniteľ tepelnej vodivosti |
|--|----------------------|------------------------------|
| | [kg/m ³] | [W/(mK)] |
| Banán s polypropylénovými vláknami | 980 - 1040 | 0,157 - 0,182 |
| Lisovaná cukrová trstina | 70 - 350 | 0,046 - 0,055 |
| Kukurličné klasy | 171 - 334 | 0,101 |
| Stonky bavlníka | 150 - 450 | 0,0585 - 0,0815 |
| Datľová palma | 187 - 389 | 0,072 - 0,085 |
| Durian | 357 - 907 | 0,064 - 0,185 |
| Palma olejová | 20 - 120 | 0,055 - 0,091 |
| Pekanový orech | 600 - 680 | 0,0884 - 0,1030 |
| Listy ananásu | 178 - 232 | 0,035 - 0,042 |
| Rákosie | 130 - 190 | 0,045 - 0,056 |
| Ryža | 154 - 168 | 0,0464 - 0,566 |
| Vlákna Sansevierie | 1410 | 0,132 |
| Slnečnica (celá rastlina, čiastočne zbavená oleja) | 500 - 585 | 0,0885 - 0,110 |
| Slnečnica (jadro stonky) | 36 - 152 | 0,0385 - 0,0501 |
| Balík slamy | 50 - 150 | 0,038 - 0,067 |

Tab. 3: Vlastnosti niektorých recyklovaných tepelných izolantov [3]

| Materiál | Hustota | Súčiniteľ tepelnej vodivosti |
|---|----------------------|------------------------------|
| | [kg/m ³] | [W/(mK)] |
| Bavlna (recyklovaná) | 25 - 45 | 0,039 - 0,044 |
| Bavlna (recyklovaná džínsovina) | N | 0,036 - 0,038 |
| Recyklované sklo | 450 | 0,031 |
| Recyklované sklo | 100 - 165 | 0,038 - 0,050 |
| Recyklovaný PET | 30 | 0,0355 |
| Recyklovaný PET | 15 - 60 | 0,034 - 0,039 |
| Recyklovaný textil | 30 - 80 | 0,0358 - 0,042 |
| Recyklované textilné vlákna (polyester, polyuretán) | 440 | 0,044 |
| Recyklované textilné vlákna (syntetika) | 200 - 500 | 0,041 - 0,053 |
| Recyklovaný textil a papier | 433 | 0,034 - 0,039 |

4. Analýza niektorých tepelných izolantov z hľadiska environmentálnej charakteristiky

Konfrontačná LCA analýza súvisiaca s energetickou spotrebou a potenciálom globálneho otepľovania na základe dát od výrobcov a vedeckej literatúry porovnáva niektoré tepelnoizolačné materiály. Dáta sú zbierané z rôznych zdrojov, čoho následkom je použitie rôznych prístupov analýzy (CTGA/CTGR). Použitá metóda je uvedená v tabuľke [10].

Tab. 4: Vlastnosti niektorých prírodných tepelných izolantov [10]

| Materiál | f.j. váhy | Súčiniteľ tepelnej vodivosti | Spotreba energie | Potenciál globálneho otepľovania | Metóda |
|------------------------|-----------|------------------------------|------------------|----------------------------------|-----------------|
| | [kg] | [W/(mK)] | [MJ na f.j.] | [kg CO ₂ na f.j.] | |
| Celulóza | 2,34 | 0,039 | 19,39 | 0,73 | CTGA, Európa |
| Celulóza | 2,00 | 0,040 | 20,97 | 3,66 | N |
| Korok | 5,00 | 0,050 | 257,98 | 5,72 | CTGA, Európa |
| Korok | 7,35 | 0,049 | 378,65 | 5,93 | N |
| Expandovaná hlina | 31,50 | 0,090 | 161,14 | 10,31 | CTGA, Európa |
| Expandovaný perlit | 4,50 | 0,050 | 67,31 | 3,99 | CTGA, Európa |
| Expandovaný polystyrén | 0,80 | 0,040 | 127,31 | 5,05 | CTGA, Európa |
| Expandovaný polystyrén | 1,13 | 0,038 | 118,67 | 8,25 | N |
| Expandovaný polyuretán | 0,90 | 0,030 | 126,40 | 5,31 | CTGA, Európa |
| Expandovaný vermikulit | 6,30 | 0,070 | 53,37 | 3,36 | CTGA, Európa |
| Extrudovaný polystyrén | 1,75 | 0,350 | 127,31 | 13,22 | CTGA, Európa |
| Sklenené vlákna | 0,80 | 0,040 | 134,17 | 7,70 | CTGA, Európa |
| Sklenená vlna | 8,00 | 0,050 | 229,02 | 9,89 | CTGA, Európa |
| Konope | 1,20 | 0,038 | 23,65 | 0,17 | CTGR, N |
| Konope | 1,90 | 0,040 | 35,55 | 0,26 | CTGR, N |
| Jutové vlákna | 5,00 | 0,050 | 105,54 | 2,79 | CTGA, Európa |
| Kenaf | 1,52 | 0,038 | 59,37 | 3,17 | CTGA, Taliansko |
| Kenafové vlákna | 1,90 | 0,038 | 42,32 | 1,13 | CTGA, Európa |
| Prírodná pemza | 55,00 | 0,110 | 1,82 | 0,08 | CTGA, Európa |
| Polyuretán | 0,96 | 0,032 | 99,63 | 6,51 | N |
| Recyklovaný PET | 1,07 | 0,036 | 83,72 | 1,78 | CTGA, Taliansko |
| Recyklovaný PET | 1,48 | 0,037 | 21,06 | 3,12 | CTGR, N |
| Recyklovaný textil | 1,79 | 0,036 | 17,57 | 1,55 | CTGR, N |
| Ovčia vlna | 0,76 | 0,038 | 17,12 | 1,46 | CTGR, N |
| Kamenná vlna | 1,20 | 0,040 | 53,09 | 2,77 | CTGA, Európa |

5. Záver

Z prehľadu vlastností rozličných tepelnoizolačných materiálov vyplýva, že súčasne používané tepelné izolácie majú väčší dopad na životné prostredie ako väčšina nekonvenčných prírodných a recyklovaných materiálov spomenutých v prehľade. Okrem tepelnoizolačných vlastností materiálov v ich ustálenom stave, je potrebné zamerať sa aj na ich správanie sa v stave meniaceho sa teplotného poľa v čase. Častým problémom prírodných materiálov je ich nízka hmotnosť, ktorá má za následok ich nízku účinnosť v letnom období. Nemenej dôležitý je aj vlhkosťný režim materiálov.

V súčasnej dobe je nutné sústrediť sa na vývoj nových materiálov s optimálnymi tepelnoizolačnými vlastnosťami pri zachovaní ich nízkeho vplyvu na životné prostredie. Je potrebné uvedomiť si, že jediným cieľom nie je zlepšovanie tepelnotechnických parametrov materiálov. Podstatné je zamerať sa taktiež na životný cyklus materiálov od výroby po koniec ich zneškodnenie alebo recykláciu.

Literatúra

- [1] *Global Energy and CO2 Status Report: The Latest Trends in Energy and Emissions 2018* [online]. International Energy Agency, Marec 2018, 29s. Dostupné z: https://webstore.iea.org/download/direct/2461?fileName=Global_Energy_and_CO2_Status_Report_2018.pdf
- [2] Energy Efficiency: Buildings: The global exchange for energy efficiency policies, data and analysis. *iea.org* [online]. International Energy Agency. Dostupné z: <https://www.iea.org/topics/energyefficiency/buildings/>
- [3] Asdrubali, F., D'Alessandro, F., Schiavoni, S.: A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4. vydanie, s. 1-17, ISSN 2214-9937, 2015.
- [4] Valančius, K., Vilutienė, T., Rogoža, A.: Analysis of the payback of primary energy and CO2 emissions in relation to the increase of thermal resistance of a building. *Energy and Buildings*, 179. vydanie, s. 39-48, ISSN 0378-7788, 2018.
- [5] Abu-Jdayil, B., Mourad, A-H., Hittini, W., Hassan, M., Hameedi, S.: Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. *Construction and Building Materials*, 214. vydanie, s. 709-735, ISSN 0950-0618, 2019.
- [6] CHMÚRNY, I.: *Tepelná ochrana budov*. Jaga group, ISBN 8088905273, 2003.
- [7] PALKO, M., OLÁH, J.: *Strechy z pohľadu energie*, 1. vydanie. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Nakladateľstvo STU v Bratislave, ISBN 978-80-227-4167-5, 2014.
- [8] International Organization for Standardization, ISO14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – principles and framework, 2006.
- [9] International Organization for Standardization, ISO14044:2006 Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines, 2006.
- [10] Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., Asdrubali, F.: Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62. vydanie, s. 988-1011, ISSN 1364-0321, 2016.

Silvia Križanová¹

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, 2. ročník.

APLIKÁCIA PASÍVNYCH SMART ZASKLENÍ V OBYTNÝCH BUDOVÁCH - OKNO S ADAPTÍVNÝM TERMO-CHROMOMICKÝM ZASKLENÍM

APPLICATION OF PASSIVE SMART GLAZING IN RESIDENTIAL BUILDINGS - ADAPTIVE THERMO-CHROMOMIC WINDOW

Abstract

Recent advances in material science offer innovative glazing systems using advanced technologies to improve the mechanical, physical and chemical properties of glazing. The primary function of solar protection is the ability to control the impact of solar radiation. Dynamic glazing systems also called smart windows by modulating the amount of entering infrared radiation and visible light allow to control heat gains, contribute to a significant reduction in building energy demand as well as ensuring the natural lighting conditions. Thermo-chromic glazing is able to modulate transmittance in visible and infrared range of solar radiation by reversible change of crystal structure above a particular environmental temperature. In this article required properties for smart window and the properties of thermochromic glazing are described.

Kľúčové slová

Adaptívne zasklenie, modulácia solárnej energie, termo-chromické zasklenie, vizuálny komfort, tepelný komfort.

1. Úvod

Zvyšujúce sa požiadavky na energetickú náročnosť budov prinášajú potrebu navrhovať budovy, ktoré ponúkajú vysokú úžitkovú hodnotu dosiahnutú synergiou kvality spracovaného návrhu, použitého stavebného materiálu, kvality výstavby, technickej, technologickej a environmentálnej kvality budovy. Jedným z faktorov zvyšujúcich energetickú náročnosť budov je vplyv slnečného žiarenia. Vývoj adaptívnych dynamických fasádnych komponentov umožňuje moduláciu a riadenie prestupu slnečného žiarenia okennou konštrukciou, zlepšenie vizuálneho a tepelného komfortu a vo výsledku zníženie energetickej náročnosti budovy. Potreba energie na vykurovanie, chladenie a osvetlenie pokrýva prevažnú časť energetických požiadaviek v budovách. Solárna ochrana budov musí byť navrhnutá v súlade s požiadavkami pre zabezpečenie optimálneho vizuálneho a tepelného komfortu pre konkrétnu prevádzku budovy v závislosti od funkčného využitia objektu. Inovatívne adaptívne okenné konštrukcie v správne navrhnutom koncepte majú veľký potenciál aplikácie vo funkcií solárnej ochrany objektov. Optimálnym výsledkom je aplikácia adaptívnych zasklení v konštrukcii okenných a fasádnych prvkov bez potreby zabudovania ďalších tieniacich prvkov. Podmieňujúce požiadavky pre splnenie opísaného cieľa sú zlepšenie schopnosti modulácie prestupu

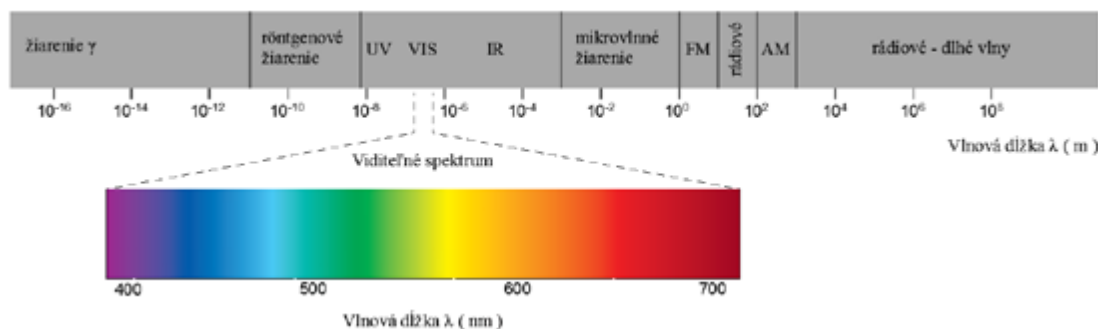
¹ Ing. Silvia Križanová, Katedra konštrukcií pozemných stavieb, Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Radlinského 11, 810 05, Bratislava, tel.: (+421) 911 553 906, e-mail: silvia.krizanova@stuba.sk

solárnej energie v infračervenej oblasti slnečného žiarenia pri zachovaní vysokej priepustnosti viditeľného svetla, možnosť regulácie systému a funkcia tienenia.

2. Slnečné žiarenie a tepelno-optické vlastnosti zasklenia

2.1 Slnečné žiarenie

Pod pojmom slnečné žiarenie rozumieme elektromagnetické žiarenie zložené z elektromagnetického spektra so špecifickými vlnovými dĺžkami. Optické elektromagnetické žiarenie leží v rozsahu vlnových dĺžok medzi prechodovou oblasťou röntgenového žiarenia ($\lambda \approx 10$ nm) a prechodovou oblasťou rádiových vln ($\lambda \approx 1$ mm) [1]. Kvalita vnútorného prostredia je ovplyvnená optickým žiarením, ktorého spektrum je rozdelené na ultrafialové žiarenie, viditeľné žiarenie a infračervené žiarenie v rozsahu vlnových dĺžok od 100 nm do 3000 nm. Ultrafialové žiarenie (UV) sa delí na krátkovlnné žiarenie UVC s vlnovými dĺžkami 100 - 280 nm, stredné vlnové žiarenie UVB s vlnovými dĺžkami 280 - 315 nm a dlhovlnné žiarenie UVA s vlnovými dĺžkami 315 - 400 nm. Viditeľné (VIS) žiarenie leží medzi vlnovými dĺžkami 380 - 780 nm a blízke infračervené žiarenie (NIR) leží medzi spektrálnym rozsahom 780 - 3 000 nm [1]. Viditeľné spektrum slnečného žiarenia reprezentuje viditeľné svetlo a blízke infračervené žiarenie predstavuje tepelnú zložku žiarenia. Podstatná časť UV žiarenia je pri prestupe slnečnej energie blokovávaná zasklením. Zvyšné množstvo UV žiarenia, ktoré je prenášané do interiéru negatívne ovplyvňuje vybavenie interiérového zariadenia, materiály a živé organizmy, spôsobuje degradáciu kvality a sfarbenia materiálov [2].



Obr. 1: Rozdelenie elektromagnetického žiarenia v závislosti na vlnovej dĺžke.

2.2 Prestup slnečného žiarenia zasklením

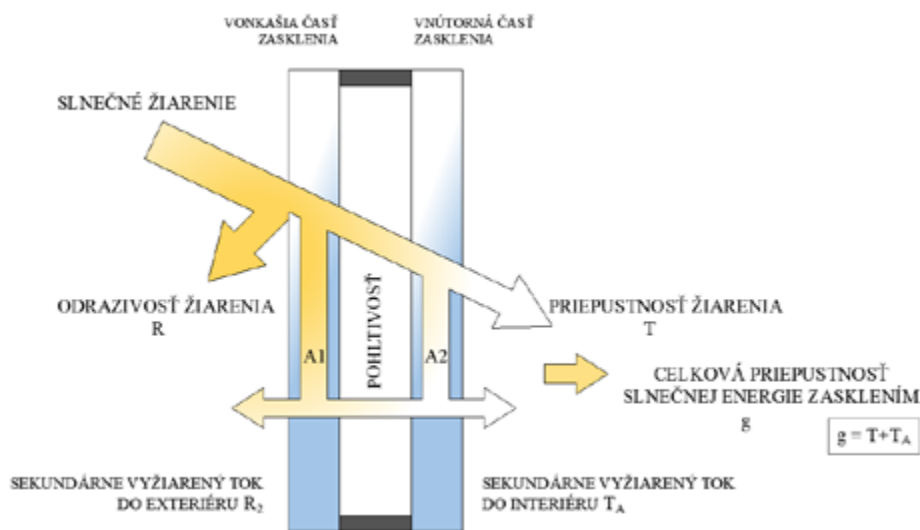
Slnečné žiarenie dosahujúce úroveň zasklenia je čiastočne odrazené, čiastočne absorbované a časť sa zasklením prenáša do interiéru. Priepustnosť žiarenia (T), odrazivosť žiarenia (R) a pohltivosť žiarenia (A) charakterizujú energetické vlastnosti zasklenia. Optické vlastnosti zasklenia sú charakterizované činiteľom svetelnej priepustnosti T_v . Hodnota celkovej priepustnosti slnečnej energie g zasklením zahŕňa priamu priepustnosť slnečného žiarenia zasklením a vyžiarený tepelný tok skleneným systémom do interiéru [3]. Celkové množstvo prenášaného, absorbovaného a odrazeného slnečného žiarenia závisí od vlnovej dĺžky (λ), uhla dopadu slnečných lúčov a optických vlastností materiálu zasklenia [2].

Tepelno - optické vlastnosti sa vyznačujú tromi kľúčovými parametrami zasklievacích systémov:

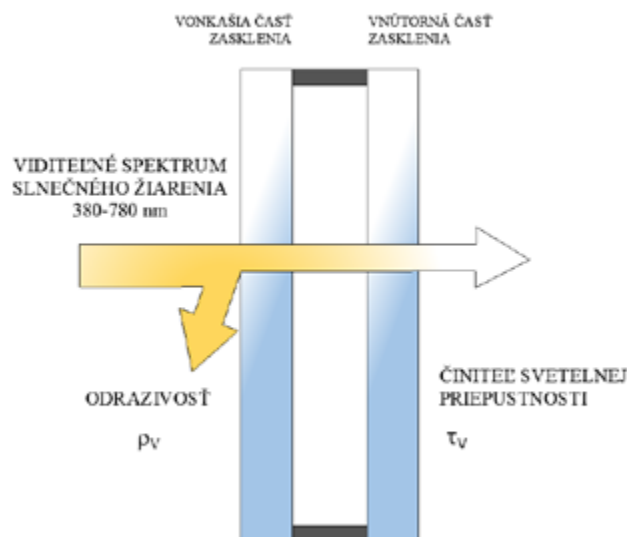
- Súčiniteľ prechodu tepla vonkajších otvorových konštrukcií U_w .
- Celková priepustnosť slnečnej energie zasklením g .
- Činiteľ svetelnej priepustnosti τ_v .

Zabezpečenie optimálnych tepelno-optických vlastností zasklievacích systémov inteligentných okien je podmienkou vytvorenia vhodného vnútorného prostredia v budovách. Pre použitie v okenných a fasádnych konštrukciách obytných budov je potrebné aby opísané parametre dosahovali hodnoty :

- $U_{w,N} = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ - normová hodnota platná v súčasnosti,
 $U_{w,r2} = 0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$ - normová hodnota platná od 1. 1. 2021
 $U_{w,r3} = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ - odporúčaná hodnota platná od 1. 1. 2021
- $g \geq 0,6 - 0,7$
- $\tau_v \geq 0,7$



Obr 2: Energetické vlastnosti izolačného zasklenia.



Obr 3: Prestup viditeľného spektra slnečného žiarenia izolačným zasklením.

Nevhodná koncepcia denného osvetlenia by mohla viesť k nedostatku prirodzeného osvetlenia , zvýšeniu vnútorného tepla, nadmernej energetickej náročnosti budovy a k zhoršeniu hygienickej kvality životného prostredia. Dôležitá požiadavka na inteligentné zasklievacie systémy pre bytové domy je zabezpečenie dostatočného prenosu viditeľného svetla počas užívania priestorov v oboch stavoch aktivácie systému.

3. Ideálne adaptívne okno pre obytné budovy

Ideálny systém inteligentných okien pre obytné budovy je možné definovať ako systém, ktorý moduláciou tepelno-optických vlastností, umožňuje výrazné úspory energie, zabezpečuje tepelný a vizuálny komfort pre obyvateľov a súčasne zaisťuje vysokú priepustnosť viditeľného spektra slnečného žiarenia.

3.1 Adaptivita okenných konštrukcií

Opatrenia zabezpečujúce ochranu vnútorného prostredia aplikované na okenné konštrukcie musia poskytovať tepelné aj vizuálne pohodlie spoľahlivo a efektívne. Adaptívne konštrukcie dokážu prispôbiť potrebné vlastnosti meniacim sa vnútorným a vonkajším podmienkam a reagovať na požiadavky užívateľov. Zároveň by mali zabrániť nechceným slnečným ziskom v lete a naopak umožniť vysoké slnečné zisky v zime. Primárnou funkciou je možnosť riadenia priestupu dopadajúcich zložiek slnečného žiarenia.

Adaptivitu okenných konštrukcií je možné dosiahnuť v makromierke doplnením o funkčné konštrukčné prvky interiérového a exteriérového tienenia alebo v mikromierke úpravou optických a tepelnoizolačných vlastností zasklení.

Príkladom doplnkových konštrukčných prvkov sú fixné a mobilné tieniace prvky ako vonkajšie žalúzie, rolety, markízy, špeciálne okenné konštrukcie zakomponované do konceptu tak aby boli schopné reagovať na vonkajšie podmienky a požiadavky užívateľa. Tieto systémy prepájame do integrovaných systémov a vytvárame tak adaptívne integrované okenné konštrukcie, ktoré sú schopné reagovať na podnety podľa nastavení, ovládania na mieste alebo diaľkového ovládania užívateľom. V stave aktivácie sú tieto prvky prínosné z hľadiska regulácie priestupu slnečnej energie a oslnenia najmä v lete, čím umožňujú znižovať záťaž vnútorného prostredia od nadmerných ziskov, v zime naopak v stave neaktívnom nezabraňujú priestupu slnečnej energie v prospech solárnych ziskov. Nevýhodou systémov je priame ovplyvnenie priestupu denného svetla, ktorý v stave aktivácie (stiahnuté rolety, žalúzie, tieniace markízy a pod.) znižujú, prípadne úplne zablokujú.

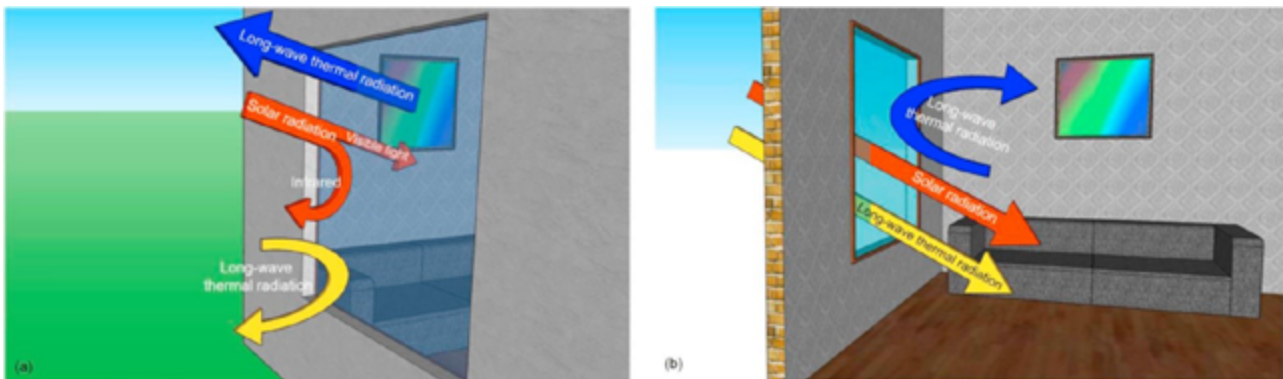
Ďalšia možnosť vytvorenia adaptívnej konštrukcie je aplikácia smart zasklení, ktoré umožňujú dynamicky meniť požadované vlastnosti, zlepšiť vnútorné prostredie a zároveň prispievajú k výraznému zníženiu energetickej náročnosti budov. Vhodnosť riešenia je podmienená výberom optimálnej koncepcie vlastností adaptívneho zasklenia, ktorá by mala vo výsledku zabezpečiť nezávislú moduláciu nízkeho infračerveného žiarenia (NIR) a viditeľného svetla (VIS), takže užívateľ môže znížiť priepustnosť VIS bez ovplyvnenia priepustnosti NIR a naopak.

Inteligentné zasklenia môžeme rozdeliť na pasívne a aktívne. Modulácia vlastností zasklenia môže byť samo-aktivovateľnými adaptívnymi mechanizmami prejavujúcimi pasívne adaptívne správanie alebo technológiami aktívnymi/inteligentnými technológiami aktivovanými externým stimulom [4]. Pasívne zasklenia sa nedajú voľne regulovať a reagujú na zmeny teploty a slnečného žiarenia. Aktívne zasklenia možno regulovať, reagujú na elektrický podnet. Medzi pasívne zasklenia patria fotochromické, termotropické a termochromické zasklenia. Medzi aktívne zasklenia patria elektrochromické zasklenia, SPD, LCD, GC, PDLC zasklenia, zasklenia s mikrožalúziami a pod.

Pasívne systémy reagujú na vonkajšie podnety autonómne bez pridaného vstupu. Táto variácia inteligentných okien je pohodlnejšia a vhodnejšia pre obytné budovy z dôvodu samostatnej aktivácie a deaktivácie bez potreby ľudských vstupov, energetických vstupov a nastavení systému.

3.2 Požiadavky na vlastnosti adaptívnej okennej konštrukcie pre bytové domy

Využitie inovatívnych povlakov umožňuje zlepšiť výkonnosť zasklievacích systémov pridaním nových pevných vlastností (antireflexia, nízka emisia, a pod.), ako aj dynamických (samočistenie, samovoľné zahrievanie, dynamická regulácia slnečného žiarenia a pod.) [5].



Obr. 4: Ideálna prevádzka okna v letnom a zimnom období [6].

Požadované vlastnosti inovatívneho pasívneho zasklenia pre obvodové plášte budovy a aplikačné technológie [5] :

- Fixné vlastnosti :

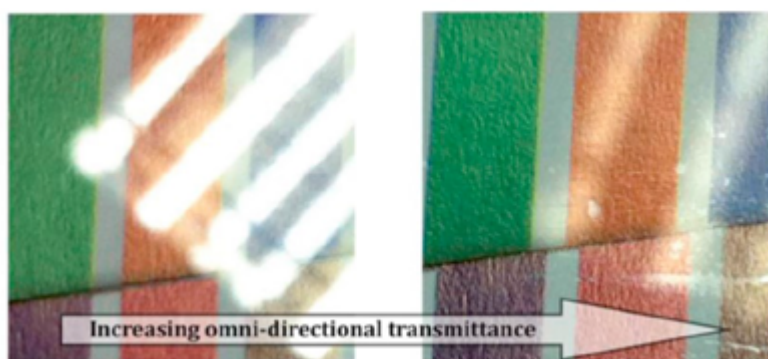
- *Nízka emisivita* - zníženie tepelných strát, technológia nanopovlakov oxidov kovov.
- *Antireflexia* - Maximalizácia transmitancie viditeľného svetla zasklením, technológia nanopovlakov polymérov/oxidov.
- *Mechanická odolnosť* - Zvýšenie trvanlivosti, technológia nanočastíc oxidu kremičitého.
- *Lahká čistiteľnosť* - zníženie údržby a zlepšenie prestupu viditeľného svetla, technológia hydrofóbného nanopovlaku oxidu kremičitého.

- Smart vlastnosti :

- *Samočistiaca schopnosť* - zníženie údržby a zlepšenie prestupu viditeľného svetla, technológia fotokatalytických nanočastíc oxidu titaničitého.
- *Pasívne dynamické riadenie*. Modulácia slnečného žiarenia, tepelný a vizuálny komfort. Technológia termochromických a fotochromických materiálov [5].

- Optimálny adaptívny systém musí zabezpečiť:

- Nezávislá modulácia a regulácia energetických a optických vlastností zasklenia.
- Efektívny rozsah modulácie jednotlivých vlastností.
- Zaistenie tepelného a vizuálneho komfortu pre konkrétnu prevádzku budovy.
- Trvanlivosť zasklenia a aplikovaných nanopovlakov.



Obr. 5: Príklad zlepšenia transmitancie svetla použitím antireflexnej úpravy zasklenia [6].

4. Termochromické zasklenie

Prevažná časť adaptívnych zasklievacích systémov s reguláciou infračerveného slnečného žiarenia ovplyvňuje prenos viditeľného svetla. Pasívne prepínateľné termochromické (TC) zasklievacie materiály sú priehľadné materiály s reverzibilnou zmenou optických vlastností zmenou kryštálovej štruktúry výsledkom reakcie na zmenu teploty okolia a dá sa očakávať, že sa tieto materiály budú plnohodnotne využívať v prvkoch solárnej ochrany [7]. Termochromické okná s reguláciou infračerveného slnečného žiarenia v malej miere ovplyvňujú prestup viditeľného svetla a sú najslubnejšou technológiou modulácie slnečnej energie a ochrany pred slnečným žiarením.

4.1 Termochromické zasklenia na báze oxidu vanadičitého (VO_2)

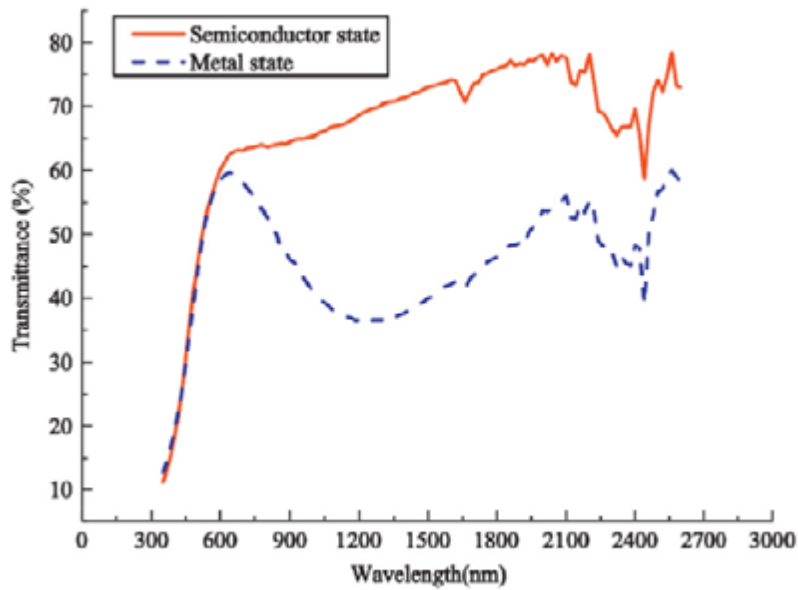
Oxid vanadičitý (VO_2) je najpoužívanejší termochromický materiál pre aplikácie v oblasti smart zasklení. VO_2 má schopnosť vysokej modulácie slnečného žiarenia pri teplote okolitého prostredia $T_c \approx 68^\circ \text{C}$. Keď teplota stúpne a dosiahne kritickú hodnotu, nastane prechod z polovodiča na kov. Ideálne inteligentné okno s vrstvou VO_2 by mohlo prenášať IR a VIS studenou/neaktívnom stave (monoklinická fáza / polovodič, VO_2 (M)), ale odrážať IR v aktivovanom stave (rutilová / kov fáza, VO_2 (R)), pri súčasnom zachovaní priepustnosti viditeľného svetla [8]. Prechodná teplota 68°C je oveľa vyššia ako teplota miestnosti. Hodnota kritickej teploty sa v súčasnosti vývojom rôznych spôsobov aplikácie a dopovaním VO_2 (V_2O_5 , WO_3 , SnO_2 , SiN_x a pod.) znižuje, čím sa značne zvyšuje potenciál využitia termochromického zasklenia.

Povlakové filmy VO_2 sa môžu pripraviť pomocou niekoľkých metód, vrátane metódy chemického roztoku, procesu sol-gélu, odparovania elektrónovým lúčom, depozície atómovej vrstvy (ALD), pulzného laserového depozície (PLD) a magnetronového naprašovania, hydrotermálnej syntézy a pod. [9].

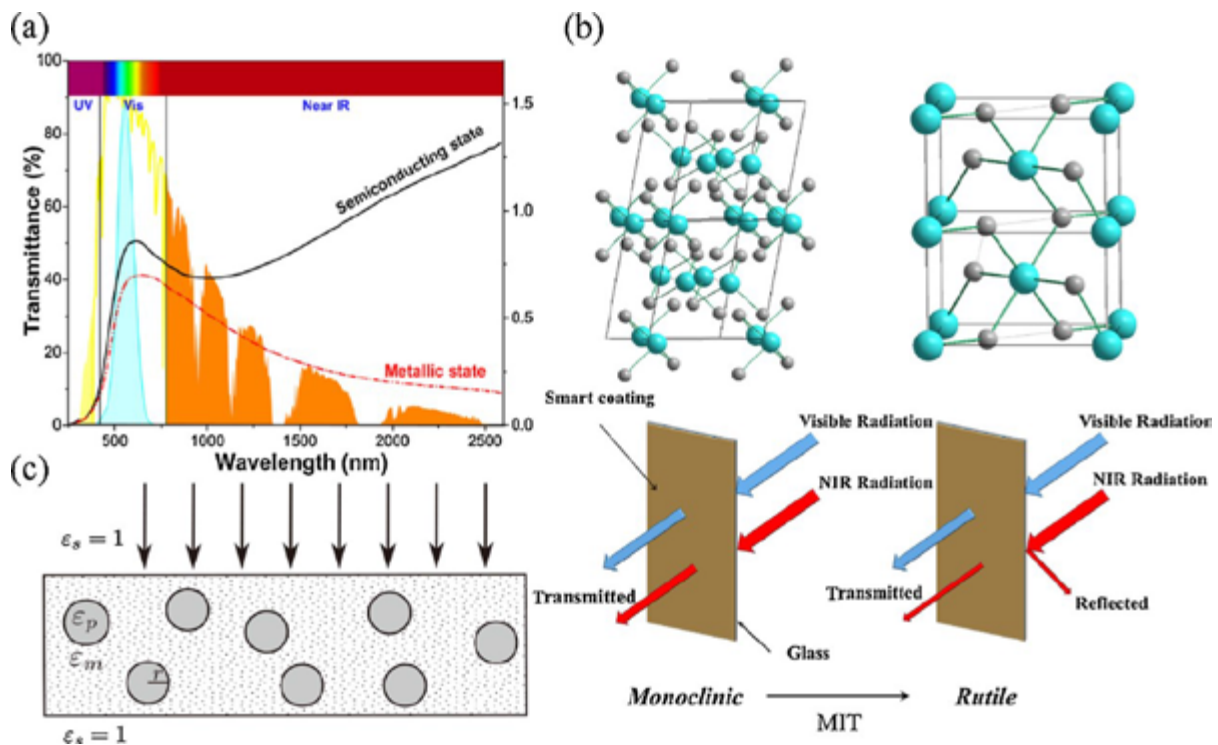
Existujú ciele a výzvy na zlepšenie termochromických vlastností zasklenia, ktorých dosiahnutie značne ovplyvní rozšírenie aplikácie v zasklievacích systémoch :

- Zlepšenie priepustnosti viditeľného spektra slnečného žiarenia T_{vis} (τ_v).
- Zvýšenie schopnosti modulácie solárnej energie ΔT_{sol} .
- Zníženie kritickej teploty T_c .
- Minimalizovanie, prípadne úplné odstránenie hnedastého zafarbenia zasklenia spôsobeného vlastnosťami VO_2 .

Viacero z opísaných nedostatkov sa v súčasnom vývoji VO_2 termochromických zasklení podarilo zlepšiť / odstrániť.

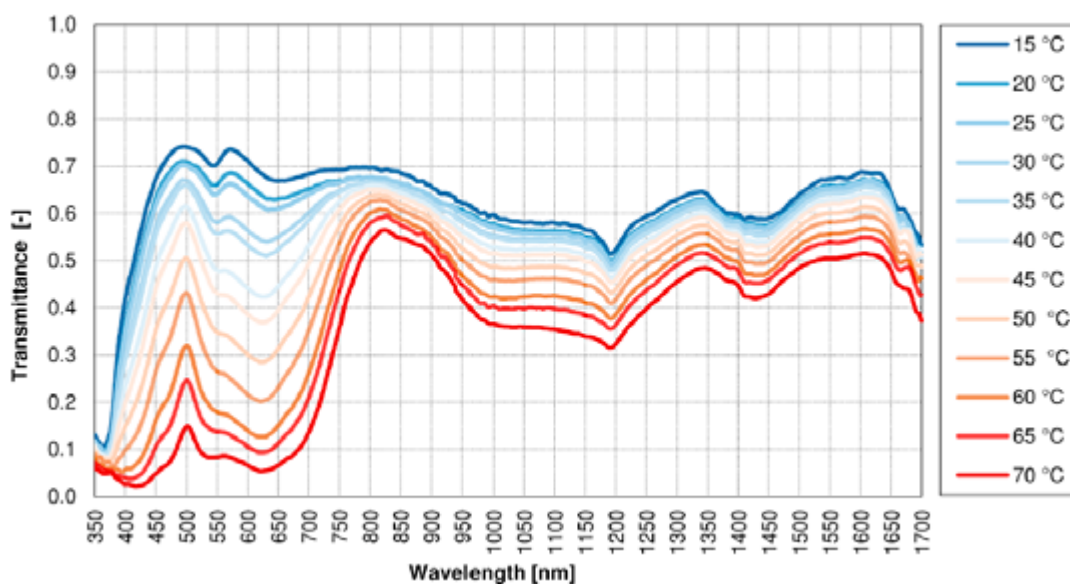


Obr. 6: Spektrálna transmittancia zasklením s VO₂ povlakom[10].



Obr. 7: a) Solárne spektrum; b) Kryštálová štruktúra VO₂ pred a po fázovom prechode; c) Štruktúrny model [9].

Na obr. 8 je znázornená spektrálna priepustnosť pre rôzne povrchové teploty vzorky termochromického zasklenia. Vzorka je vrstvené sklo zložené z dvoch tabúľ z číreho skla spojených termochromatickou medzivrstvou odolnou voči roztrhnutiu. Dve sklenené tabule sú hrubé 3 mm, zatiaľ čo medzivrstva je hrubá 1 mm, pre celkovú hrúbku 7 mm [7].



Obr. 8: a) Solárne spektrum; b) Kryštalová štruktúra VO₂ pred a po fázovom prechode;
c) Štruktúrálly model [7].

Vhodnosť pasívneho termochromického zasklenia pre použitie v bytových budovách je podmienená jednoduchým ovládaním (samo-ovládaním), ktoré zabezpečuje aktiváciu a deaktiváciu systému bez akýchkoľvek potrebných vstupov. Pre konštrukciu vhodného termochromického zasklenia pre obytné budovy v miernom klimatickom podnebí je potrebné kombinovať tepelnoizolačné a adaptívne zasklievacie systémy. Pridaním možnosti regulácie fázového prechodu VO₂ a pridaním funkcie tienenia je možné dosiahnuť optimálnejšiu prevádzku a umožniť užívateľom prispôbiť si konkrétny stav (v danom čase a pri daných okrajových podmienkach) podľa vlastných požiadaviek. Pri kombinácii termochromického zasklenia a tepelnoizolačných systémov je nutné vo výsledku zabezpečiť dostatočný prestup viditeľného svetla a celkovej priepustnosti slnečnej energie.

5. Záver

Slnečné žiarenie prijaté cez transparentné výplne otvorov obvodového plášťa budovy má dôležitý vplyv na energetické potreby budovy. V súčasnosti existuje obrovský pokrok v technológiách inteligentného zasklenia, ktoré ponúkajú moduláciu a reguláciu priepustnosti slnečného žiarenia do vnútorného prostredia a vedú k úsporám energií na vykurovanie, chladenie a umelé osvetlenie. Dôležitá je správna koncepcia a návrh druhu smart zasklenia v súlade s požiadavkami na konkrétnu prevádzku v budove. Pasívne termochromické zasklenia sú vhodné na použitie v obytných budovách vďaka jednoduchej a nepretržitej prevádzke. K aktivácií a deaktivácií systému nie sú potrebné žiadne energetické vstupy a ovládanie. Cieľom je vyvinúť adaptívnu termochromickú konštrukciu okna s požadovanými tepelnými vlastnosťami, prídavkom funkčnej regulácie adaptívneho systému tak, aby sa vytvorilo kvalitné vnútorné prostredie s dostatkom viditeľného svetla. Podstatnou pridanou funkciou je možnosť tienenia a regulácie systému v prípade potreby užívateľa. Systém regulácie by v najvhodnejšej podobe fungoval na princípe aktívnych zasklení. Pre budúci rozvoj termochromických zasklení je dôležité zlepšiť moduláciu slnečnej energie a priepustnosť viditeľného svetla cez adaptívny systém a umožnenie tienenia tak, aby výsledná konštrukcia plnohodnotne plnila funkciu solárnej ochrany budov.

PodĎakovanie

Táto práca je podporovaná Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky prostredníctvom grantovej schémy Slovenskej technickej univerzity v Bratislave na podporu mladých výskumníkov č. 1691.

Literatúra

[1] RYBÁR, P., ŠESTÁK, F., JULKOVÁ, M., HRAŠKA, J., VAVERKA, J. *Denní osvětlení a oslunění budov*. Brno : ERA group, 2001, 271 s. ISBN 80-865-1733-0. (cit.s. 1-10).

[2] JELLE B.P. 2013. *Solar radiation glazing factors for window panes, glass structures and electrochromic windows in buildings—measurement and calculation* [online], [15. 06. 2013]. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 116, s. 291-323.

dostupné : <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.04.032>

[3] PUŠKÁR, A., SZOMOLÁNYIOVÁ, K., FUČILA, J. *Okná, dvere, zasklené steny*. Bratislava : JAGA group, 2000. 231 s. ISBN 80-88905-62-1 (cit.s. 35)

[4] FAVOINO, F., OVEREND, M., JIN, Q. 2015. The optimal thermo-optical properties and energy saving potential of adaptive glazing technologies. [online], [08. 06. 2015].

Applied Energy 156, s. 1-15.

dostupné : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.065>

[5] CASINI, M. 2018. Active dynamic windows for buildings: A review. [online], [28. 04. 2010]. *Renewable Energy* 119, s. 923-934.

dostupné : <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.049>

[6] REZAEI, S.D., a kol. 2017. A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. [online], [08. 09. 2016]. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 159, s. 26-51.

dostupné : <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.08.026>

[7] GIOVANNINI, L., a kol. 2019. Thermo-chromic glazing performance: From component experimental characterisation to whole building performance evaluation. [online], [29. 05. 2019]. *Applied Energy* 2513, s: 113335.

dostupné : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113335>

[8] WANG, N., a kol. 2018. Surface engineering on continuous VO₂ thin films to improve thermo-chromic properties: Top-down acid etching and bottom-up self-patterning. [online], [06. 11. 2017]. *Journal of Colloid and Interface Science* 512 , s. 523-535.

dostupné : <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.10.096>

[9] QU, Z., a kol. 2019. Surface and interface engineering for VO₂ coatings with excellent optical performance: From theory to practice. [online], [28. 09. 2018]. *Materials Research Bulletin* 109, s. 195-212

dostupné : <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2018.09.043>

[10] GHOSH, A., NORTON, B. 2018. Advances in switchable and highly insulating autonomous (self-powered) glazing systems for adaptive low energy buildings [online], [12. 04. 2018]. *Renewable* 126, s. 1003-1031.

dostupné : <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.038>

Roman Ruhig¹

Študijný program: D-TKPS4, 4. ročník

ALTERNATÍVNE INTEGROVANIE ENERGETICKY EFEKTÍVNEHO MEDZIPRIESTORU V KONŠTRUKČNOM SYSTÉMU PANELOVÉHO DOMU ZTB-13B

ALTERNATIVE INTEGRATION OF ENERGY-EFFICIENT INTERSPACE IN THE ZTB-13B PANEL HOUSE CONSTRUCTION SYSTEM

Abstract

From 2021 onwards, the building protection standard will be shifted to meet the target values that will increase requirements to building structures and the overall energy performance of buildings. Existing panel constructions will not receive an exception either residential buildings built after 1947, which will have to meet all of these criteria when recovering. Our work is reaction on regulation for renewal of prefabricated housing construction with a focus on interspaces as one of the mechanisms for improving the energy performance of the buildings. Contribution deals to the renovation of a prefabricated apartment block of the ZTB-13B type and alternative integration of energy efficient interspaces into existing building structures.

Kľúčové slová

Panelová výstavba, bytový dom, medzipriestor, energetická hospodárnosť budov, regulácia fasády

1. Úvod do problematiky

V súčasnosti sa na území Európskej únie vrátane Slovenska zavádzajú opatrenia, ktoré by mali byť vo výsledku priaznivé k životnému prostrediu, znižovali emisie v ovzduší a vďaka tomu aj znižovali ekologickú stopu našej planéty. Vzhľadom na to, že z celkovej spotreby energií vo svete tvoria 40% budovy, je nevyhnutné, aby sa spotreba energií v budovách zminimalizovala [1]. Európska smernica 2010/31/EU reaguje na problém spotreby energií v budovách, a preto sa od 1.1.2021 budú musieť všetky nové budovy na území EÚ budovať s takmer nulovou spotrebou energií. Aj z toho dôvodu sa začali sprísňovať technické normy, ktoré sa zaoberajú najmä tepelnou ochranou budov a ich energetickou náročnosťou. V súčasnosti, pri novostavbách a významných obnovovaných budovách stačí splniť odporúčané hodnoty [2]. Od roku 2021 sa v norme posunieme tak, že bude potrebné splniť cieľové odporúčané hodnoty, ktoré sa budú vzťahovať na stavebné konštrukcie (netransparentné fragmenty, vonkajšie otvorové konštrukcie), na memnú potrebu tepla na vykurovanie, prípravu teplej vody, klimatizáciu, osvetlenie, celkovú spotrebu energií a celkovú spotrebu primárnych energií. Výnimkou nie je ani panelová výstavba bytových domov postavená po roku 1947, ktorá bude musieť pri obnove spĺňať všetky tieto kritériá. V súčasnosti sa na Slovensku stále nachádzajú neobnovené bytové panelové domy postavené medzi 50. – 90. rokom minulého storočia. Prípadne sú niektoré z nich obnovené, no napriek tomu nespĺňajú najnovšie energetické kritériá, ktoré budú na budovy kladené po roku 2021. Dokonca budú niektoré bytové domy potrebovať skôr či neskôr ďalšiu modernizáciu. Aj z toho titulu táto práca reaguje na reguláciu pre

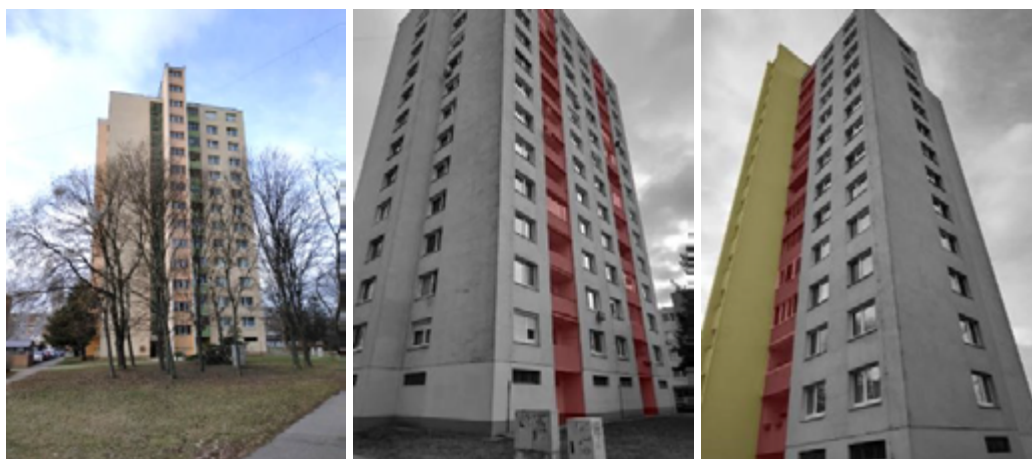
¹ Roman Ruhig, Ing. et. Ing. arch., STU BA, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

obnovu bytovej panelovej výstavby so zameraním na medzipriestory - ako jeden z mechanizmov na zlepšenie energetickej hospodárnosti budov.

2. Ciele a metodika výskumu

2.1 Ciele výskumu

Dizertačná práca, ktorej súčasťou je aj tento článok, sa zaoberá možnosťami integrácie medzipriestorov do existujúcej stavebnej štruktúry v podobe zimných záhrad, alebo skleníkov. Cieľom výskumu je regulácia presklených loggií, balkónov, ktoré si vlastníci bytových jednotiek svojvoľne a neregulovane upravujú, vďaka čomu vzniká nejednoznačný rukopis na fasádach bytových domov. Výskum bude podkladom pre možnosť regulácie medzipriestorov a fasád ako z energetického, tak aj architektonického hľadiska. Zároveň sa článok zaoberá optimalizáciou začlenenia medzipriestoru do existujúceho vykurovaného objemu a mimo neho, kde je možnosť vzniku nárazníkového priestoru. Predkladaná prípadová štúdia sa zameriava na bodový panelový bytový dom postavený v roku 1976 v konštrukčnom systéme ZTB-13B (Obrázok 1).



Obrázok 1: Existujúci stav bytového domu. Červenou je vyznačený medzipriestor, ktorý je predmetom alternatívnych pozícií voči vykurovanému objemu. Žltou je naznačený nárazníkový priestor schodiska.

2.2 Metodika výskumu

Obnova bytového fondu je mnohokrát riešená iba z pohľadu energetického a architektonické kvality sa z existujúcich budov vytrácajú. Naša zvolená metodika sa tiež v prvom kroku zaoberá porovnávaním a optimalizovaním medzipriestorov na fasáde budovy, ktorý sa stáva iba podkladom pre architektonické riešenie. To bude ďalej analyzované a vyhodnocované. Predmetný článok sa venuje iba energetickým aspektom danej prípadovej štúdie. V prvom rade je potrebné posúdiť energetickú hospodárnosť existujúceho stavu objektu a následne posúdiť energetickú hospodárnosť existujúceho stavu s pridaním zasklenia na loggiách v dvoch variantoch. Princíp prvého riešenia tkvie v zasklení, ktoré bude vytvárať nárazníkovú bariéru, no priestor loggie nebude počítaný do vykurovaného objemu. V druhom riešení integrujeme zasklený priestor loggie do vykurovaného objemu a porovnáme existujúci stav a obidve riešenia. Tento postup opakujeme aj po zateplení a výmene otvorových konštrukcií, kde bude potrebné zvoliť technické riešenia fragmentov a konštrukcií, ktoré spĺňajú cieľové odporúčane hodnoty podľa normy STN 73 0540-2. Energetická efektívnosť závisí aj od orientácie budovy na pozemku. Z toho dôvodu bude táto kalkulácia vyhotovená aj na ďalšie svetové strany a v závere bude porovnaná. Porovnané údaje nám pomôžu

k následnému vybratiu ideálneho riešenia medzipriestoru voči vykurovanému objemu v nadväznosti na svetovú stranu. Neskôr bude výber posudzovaný z architektonicko-výtvarnej stránky. Výpočty boli spracované v programe ISOVER Projektové hodnotenie 1.0 a ISOVER Fragment 5.0.

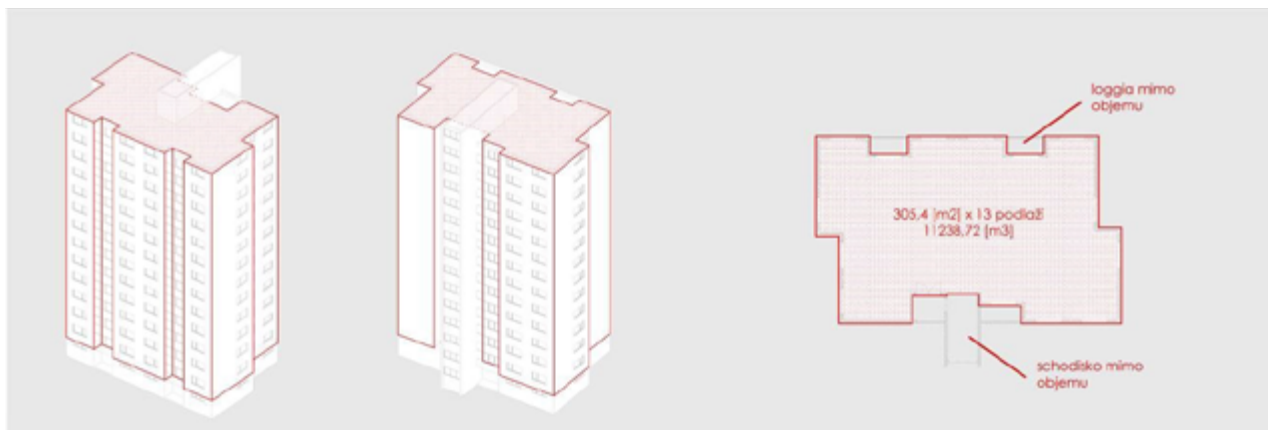
3. Výskumné fázy výpočtu energetickej hospodárnosti jednotlivých variant

3.1 Prvá fáza. Okrajové podmienky a technické riešenie teplo-výmennej obálky

Okrajové podmienky boli prebrané z tepelno-technickej normy STN 73 0540-3. Prípadová štúdia je riešená na území mesta Bratislava, ktoré sa podľa normy nachádza v teplotnej oblasti 1 s nadmorskou výškou 140 a veternou oblasťou 2. Vonkajšia výpočtová teplota je uvažovaná pre mesto Bratislava s hodnotou -11°C (výpočtová oblasť -10°C) s návrhovou relatívnou vlhkosťou vnútorného vzduchu 83,2%. Použitá navrhovaná vnútorná teplota pre bytové domy (obytné miestnosti) je 20°C s návrhovou relatívnou vlhkosťou vnútorného vzduchu 50%. Pre všeobecné porovnávanie energetickej hospodárnosti jednotlivých riešení bola navrhnutá nová skladba fragmentov jednotne. Existujúca skladba steny bola uvažovaná zo železobetónového panelu hr. 150 mm s dutinou a keramzitovým betónom hr. 260 mm. Izolácia steny bola navrhnutá z minerálnej vlny ISOVER CLIMA 034 hr. 200 mm. Existujúca skladba strechy je obdobná s tepelnou izoláciou z kamennej (čadičovej) vlny ISOVER LAM 50 hr. 400 mm. V prvom nadzemnom podlaží sa nachádza technické zázemie, „kočíkáraň“ a vstupné priestory, ktoré nebudú vykurované. Z toho dôvodu je spodnou plochou vykurovaného objemu vnútorný strop (s tepelným tokom zhora nadol) medzi prvým a druhým nadzemným podlažím. Strop je odhadovaný ako konštrukcia železobetónovej dosky hr. 150, kde bola navrhnutá zo spodnej strany tepelná izolácia ISOVER Styrodur 2800 C hr. 100 mm. Vo variante, kde je zasklenie loggie uvažované ako nárazníková bariéra, bolo potrebné na existujúcu stenu schodiska navrhnuť tepelnú izoláciu z minerálnej vlny ISOVER UNI hr. 100mm.

3.2 Druhá fáza. Projektové hodnotenie energetickej hospodárnosti budovy

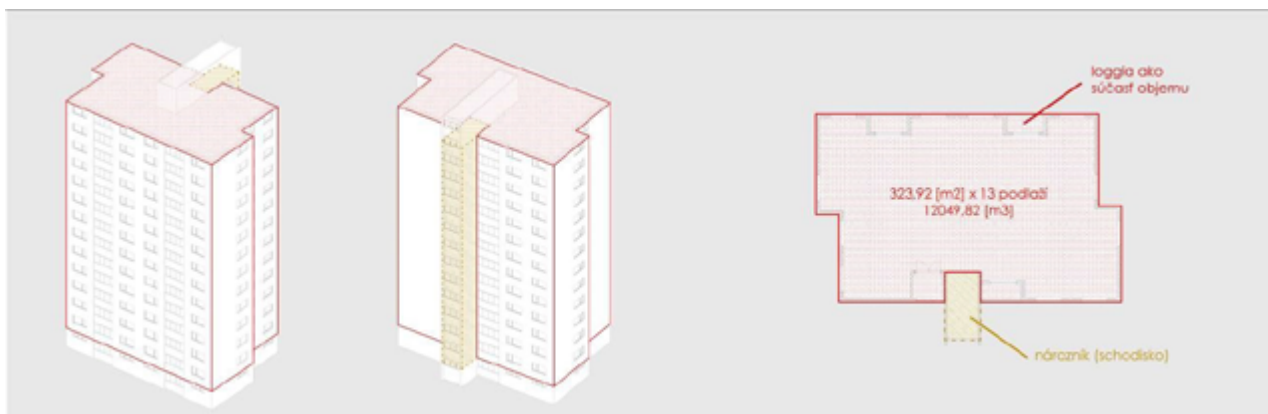
V druhej fáze bola počítaná energetická hospodárnosť budovy v existujúcom stave, ktorého orientácia je juhozápadná. Tento výpočet nám deklaroval energetickú efektívnosť budovy bez zateplenia, výmeny otvorových konštrukcií a bez zasklenia loggie (Obrázok 2). V druhom výpočte už boli existujúce loggie technicky upravené tak, že v nich bol odstránený parapet a celý otvor loggie bol presklený dvojitým zasklením (Obrázok 3). V poslednej - tretej kalkulácii skutkového stavu parapet loggie odstránený nebol. Priestor medzi loggiou a stropnou doskou bol zasklený tepelnoizolačným trojsklom. Loggia sa v tomto prípade stala súčasťou vykurovaného objemu (Obrázok 4). Výnimkou bol iba priestor schodiska, ktorý ostal naďalej ako nárazníková zóna. V štvrtej kalkulácii sme uvažovali iba s obnovením pôvodného obvodového plášťa, strechy a dosky medzi druhým a tretím podlažím, bez použitia zasklenia v loggiách (Obrázok 2). Piaty a šiesty variant je obdobný ako druhý a tretí, no s použitím tepelných izolácií a výmeny otvorových konštrukcií (Obrázok 3,4).



Obrázok 2: Vytýčenie vykurovaného objemu bez integrovania medzipriestorov



Obrázok 3: Vytýčenie vykurovaného objemu s integrovaním zasklených loggií ako nárazníkových zón



Obrázok 4: Vytýčenie vykurovaného objemu s integrovaním zasklených loggií v rámci vykurovaného objemu s výnimkou schodiska

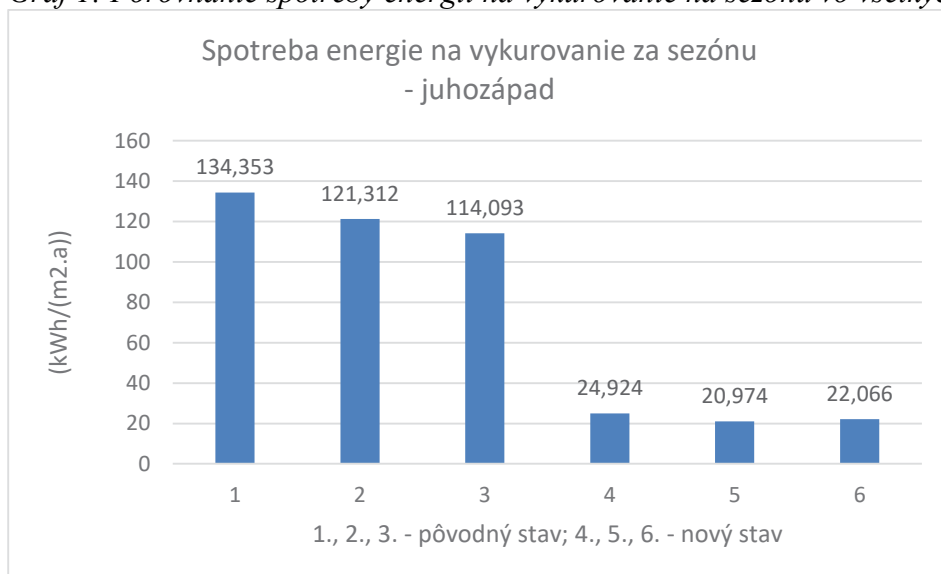
V poslednej etape druhej fázy bolo vyhotovené porovnanie medzi jednotlivými variantmi, ktoré poukazuje na zlepšenie energetickej hospodárnosti vďaka využitiu medzipriestorov. V tabuľke 1 môžeme vidieť porovnanie spotreby energie na vykurovanie za sezónu, globálneho ukazovateľa celkovej spotreby energie a globálneho ukazovateľa spotreby primárnej energie. Spotreba energie na prípravu TV za sezónu je rovnaká v každom variante, aby sa dala objektívne zhodnotiť najmä spotreba na vykurovanie. V tabuľke 1 je percentuálne vyhodnotený aj zlepšenie oproti stavu bez zasklenia.

Tabuľka 1: Porovnanie tepelno-technických výsledkov fragmentu vstupného priestoru

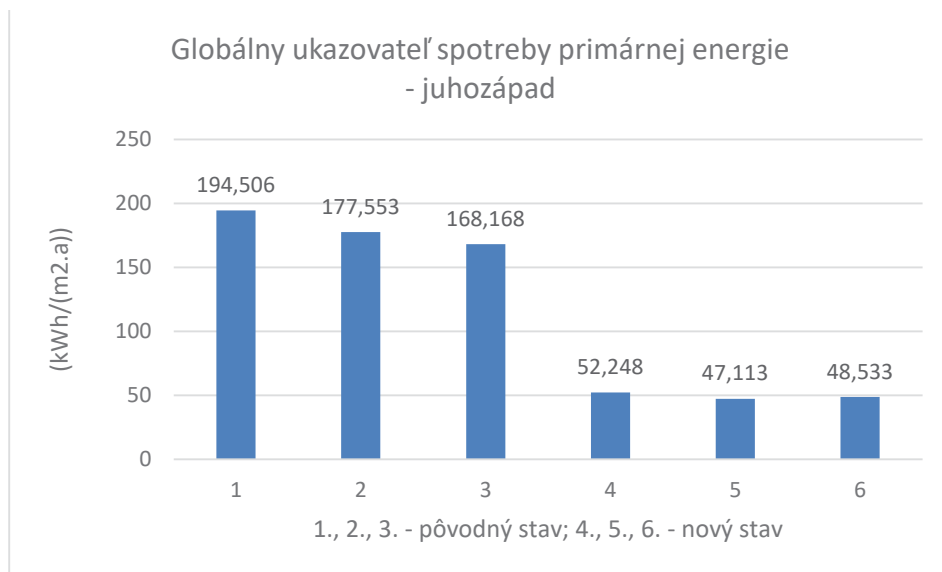
| Predpokladané zaradenie do triedy energetickej hospodárnosti | Pôvodný stav | | | Nový stav | | |
|--|-----------------------|---|--|-----------------------|---|--|
| | 1. bez medzipriestoru | 2. zasklená loggia ako nárazníkový priestor | 3. zasklená loggia v rámci vykurovaného objemu | 4. bez medzipriestoru | 5. zasklená loggia ako nárazníkový priestor | 6. zasklená loggia v rámci vykurovaného objemu |
| Spotreba energie na vykurovanie za sezónu (kWh/(m ² .a)) | 134,353 | 121,312 | 114,093 | 24,924 | 20,974 | 22,066 |
| | 0% | 9,71% | 15,08% | 0% | 15,85% | 11,47% |
| | F | E | E | A | A | A |
| Spotreba energie na prípravu TV za sezónu (kWh/(m ² .a)) | 15,267 | 15,267 | 15,267 | 15,267 | 15,267 | 15,267 |
| | B | B | B | B | B | B |
| Globálny ukazovateľ - celková spotreba energie (kWh/(m ² .a)) | 149,62 | 136,578 | 129,359 | 40,191 | 36,24 | 37,333 |
| | 0% | 8,72% | 13,54% | 0% | 9,83% | 7,11% |
| | D | D | D | A | A | A |
| Globálny ukazovateľ - spotreba primárnej energie (kWh/(m ² .a)) | 194,506 | 177,553 | 168,168 | 52,248 | 47,113 | 48,533 |
| | 0% | 8,72% | 13,54% | 0% | 9,83% | 7,11% |
| | D | C | C | A1 | A1 | A1 |

Zaujímavým faktom je, že pri zasklení existujúceho stavu loggie má lepšie výsledné hodnoty variant, kde je loggia v rámci vykurovaného objemu a pri obnove teplo-výmennnej obálky budovy vyhráva loggia ako nárazníkový priestor. Na grafe 1 a 2 je znázornený tento paradox s vykreslením výsledných hodnôt spotreby energie na vykurovanie za sezónu a s vykreslením globálneho ukazovateľa spotreby primárnej energie.

Graf 1: Porovnanie spotreby energií na vykurovanie na sezónu vo všetkých šiestich alternatívach



Graf 2: Porovnanie globálneho ukazovateľa spotreby primárnych energií vo všetkých šiestich alternatívach



3.3 Tretia fáza. Porovnanie energetickej hospodárnosti nového stavu podľa svetových strán

Jeden z vplyvov na celkovú energetickú efektívnosť budovy je aj umiestnenie na pozemku a orientácia na svetové strany. Vzhľadom na to, že rovnaký typ panelového bytového domu nemusí byť orientovaný iba na jednu stranu, bolo potrebné vybrať svetové strany, kde by prebehla rovnaká kalkulácia, ako v druhej fáze. Severnú, severovýchodnú a severozápadnú stranu sme nebrali do úvahy, nakoľko objekty tohto typu na ne neboli nikdy umiestňované. Solárne zisky na juhozápadnej strane a na juhovýchodnej sú totožné, ako aj solárne zisky na východnej a západnej strane. Pravdaže záleží aj od pomeru presklenia na jednotlivých fasádach, no v našom prípade je na bočných fasádach pomer okien približne rovnaký. Dôležité sú iba čelné fasády, pre ktoré sme nakoniec zvolili tri svetové strany: juhozápad, juh a západ. V tabuľke 2 je znázornené porovnanie rôznych prístupov integrácie medzi priestorov (variant 4, 5, 6 z fázy 2), ktorých výsledky energetickej hospodárnosti sú značne ovplyvnené svetovou stranou. Vo všetkých svetových stranách má najlepšie hodnoty zasklená loggia ako nárazníkový priestor. Na juhozápadnej strane je rozdiel medzi variantom päť a šesť 4,38 %, na južnej 4,35 % a na západnej strane iba 1,12%. Z výsledkov je zrejmé, že z hľadiska energetickeho má juhozápadná a južná strana podobné hodnoty a preferované by boli loggie vo forme nárazníkového priestoru. Na západnej strane majú celkové hodnoty priaznivejšie hodnoty, no sú skoro v rovnocennej pozícii a výber daného presklenia loggie nemusí podliehať energetickemu hľadisku. V tomto prípade môžeme brať do úvahy najmä architektonické stvárnenie loggie.

Tabuľka 2: Porovnanie energetickej hospodárnosti nového stavu podľa svetových strán

| Predpokladané zaradenie do triedy energetickej hospodárnosti | Nový stav | | | | | | | | |
|--|-----------------------|---|---|-----------------------|---|---|-----------------------|---|---|
| | Juhozápad | | | Juh | | | Západ | | |
| | 4. bez medzipriestoru | 5. zasklená loggia ako nárazníkový priestor | 6. zasklená loggia v rámci vykurovateľného objemu | 4. bez medzipriestoru | 5. zasklená loggia ako nárazníkový priestor | 6. zasklená loggia v rámci vykurovateľného objemu | 4. bez medzipriestoru | 5. zasklená loggia ako nárazníkový priestor | 6. zasklená loggia v rámci vykurovateľného objemu |
| Spotreba energie na vykurovanie za sezónu | 24,924 | 20,974 | 22,066 | 22,897 | 19,346 | 20,342 | 25,346 | 20,616 | 20,899 |
| | 0% | 15,85% | 11,47% | 0% | 15,51% | 11,16% | 0% | 18,66% | 17,55% |

| | | | | | | | | | |
|--|-----------|--------------|--------------|-----------|--------------|--------------|-----------|---------------|---------------|
| (kWh/(m ² .a)) | rozdiel | 4,38% | | rozdiel | 4,35% | | rozdiel | 1,12% | |
| Globálny ukazovateľ - spotreba primárnej energie (kWh/(m ² .a)) | 52,248 | 47,113 | 48,533 | 48,447 | 44,997 | 46,292 | 52,797 | 46,648 | 47,016 |
| | 0% | 9,83% | 7,11% | 0% | 7,12% | 4,45% | 0% | 11,65% | 10,95% |
| | rozdiel | 2,72% | | rozdiel | 2,67% | | rozdiel | 0,70% | |

4. Zhodnotenie

V predkladanom výskume sme sa zaoberali energetickou stránkou obnovy bytového domu a vplyvu energeticky efektívneho medzipriestoru na celkovú energetickú hospodárnosť budovy. Výskum je určitým podkladom pre výber typu medzipriestoru, ktorého výsledok závisel od miery použitia tepelných izolácií, od miery integrovania loggií do vykurovaného objemu a od orientácie na svetové strany. Porovnanie jednotlivých alternatív nabáda k jednoznačnému výberu zasklenej loggie ako nárazníkového priestoru (iba v prípade komplexnej obnovy), no netreba zabúdať na architektonicko-výtvarné aspekty, ktoré budú skúmané v ďalšom štádiu dizertačnej práce. Prípadová štúdia rieši jeden z mnohých panelových konštrukčných systémov bytovej výstavby minulého storočia. V práci by bolo potrebné pokračovať a porovnať podobné výpočtové metódy aj iných konštrukčných systémov panelovej výstavby. Konštrukčný systém ZTB-13B je dobrým príkladom bodového typu bytového domu s loggiami, no existujú aj ďalší reprezentanti ako napr. pozdĺžny konštrukčný systém T06B BA, kde absentujú loggie a je možné pristavať medzipriestor po celej ploche bytového domu.

Literatúra

[1] Údaje prevzaté z časopisu ASB spracované v spolupráci s firmou Stavmat Stavebniny s.r.o. <https://www.asb.sk/stavebnictvo/zateplenie/poziadavky-natepelnotechnicke-vlastnosti-stavebnych-konstrukcii-abudov>

[2] Článok Prof. Ing. Zuzany Sternovej, PhD. publikovaný v zborníku z konferencie Tepelná budov, máj 2013 Pod názvom: Požiadavky na tepelnú ochranu zabezpečujúce minimálne požiadavky na energetickú hospodárnosť budov

1. Knihy / Monografie

KRAJCSOVICS, L. Súčasný trendy riešenia nízkoenergetických budov. *Solárne mestá, uplatnenie stratégie solárnych*. Bratislava : Fakulta architektúry STU, 2010. s. 57-68. ISBN 978-80-227-3333-5.

KEPPL, J.- KRAJCSOVICS, L.- LEGENY, J. a kol.: *Rukoväť udržiavateľnej architektúry*. Bratislava: SKA 2013. ISBN 978-80-971205-1-1

KWOK, A. a GRONDIK, W. *The Grenn Studio Handbook*. Elsevier Inc. : Italy, 2007. ISBN 978-0-7506-8022-6.

2. Normy

Slovenská technická norma STN 73 0540-2/Z1. *Tepelná ochrana budov, Teplotechnické vlastnosti stavebných koštrukcií a budov, časť 3: Funkčné požiadavky Zmena 1*, 2016, ICS 91.120.10

Slovenská technická norma STN 73 0540-3. *Tepelná ochrana budov, Teplotechnické vlastnosti stavebných koštrukcií a budov, časť 3: Vlastnosti prostredia a stavebných výrobkov*, 2012, ICS 23.020.30

Ema Ruhigová¹, Jana Gregorová²

Študijný program: D-TKPS4 - Teória a konštrukcie pozemných stavieb, 4.ročník

VYKUROVANIE V MEŠTIANSKOM DOME – VSTUPNÉ PARAMETRE A VÝCHODISKÁ

HEATING IN A BURGHER HOUSE – INPUT PARAMETERS AND ASSUMPTIONS

Abstract

This paper deals with input parameters and bases for solving a case study of a heating system design in a burgher house. It is a follow-up to research in progress (Ema Ruhigová: Contribution to addressing non-invasive interventions in the field of technical equipment of buildings in listed buildings), which emphasizes maintaining authenticity and emphasizing the cultural aspect of sustainability. The content of the paper delimits the basic themes - Heating development and development of a burgher house - which enter into the design of heating for a historical building so as to preserve as much as possible the original values of the solved building as well as in the form of the remains of former heating systems.

Abstrakt

Tento príspevok sa venuje vstupným parametrom a východiskám pre riešenie prípadovej štúdie návrhu vykurovacieho systému v meštianskom dome. Nadväzuje na rozpracovaný výskum (Ema Ruhigová: Príspevok k riešeniu neinvazívnych zásahov v oblasti technických zariadení budov pri pamiatkovo chránených objektoch), ktorý kladie dôraz na zachovanie autenticity a zdôraznenie kultúrneho aspektu udržateľnosti. Obsah príspevku ohraničuje základné témy – vývoj vykurovania a vývoj meštianskeho domu – ktoré vstupujú do návrhu vykurovania pre historický objekt tak, aby boli v maximálnej možnej miere zachované pôvodné hodnoty riešeného objektu. Cieľom príspevku je zobrazenie škály možností pre zavedenie nových (pre súčasnú legislatívu vyhovujúcich) technológií aj vo forme čiastočného využitia niekdajších vykurovacích systémov.

Kľúčové slová

Autenticita, historické vykurovanie, meštiansky dom, technické zariadenie budov

1. Úvod

Príspevok nadväzuje na rozpracovaný výskum, ktorého zásadnou témou je kultúrny aspekt udržateľnosti, ktorý je hlavným nástrojom zachovania kultúrnej architektonickej diverzity a autenticity miest. Pamiatková ochrana sa okrem týchto zásad musí vyrovnávať aj so súčasnými normatívnymi požiadavkami a predpismi, ktorých realizovateľnosť je často v rozpore so základnými ideami pamiatkovej ochrany.

1.1 Základné parametre a východiská

¹ Ema, Ruhigová, Ing. arch. et Ing., STU BA, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

² Jana, Gregorová, doc. Ing. arch. PhD, STU BA, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Predmetom príspevku je čiastkový výstup výskumu zameraného na riešenie neinvazívnych zásahov v oblasti technických zariadení budov pri pamiatkovo chránených objektoch. Tento príspevok bude v ďalšej fáze výskumu slúžiť ako východiskový podklad pre vymedzenie predmetu riešenia prípadovej štúdie, ako aj stanovenie základných východiskových podmienok. Prípadová štúdia sa bude venovať navrhovaniu variantného spôsobu vykurovania v konkrétnom historickom objekte, kde jednotlivé varianty budú predstavovať tri základné systémy:

- alternatíva 1: znovuoobnovenie pôvodného (historického) vykurovacieho systému
- alternatíva 2: aplikácia niektorého zo súčasných vykurovacích systémov
- alternatíva 3: ich vzájomná kombinácia.

Na základe dosiahnutých výsledkov (či už z hľadiska pamiatkového, technického, alebo stavebno-fyzikálneho) budú jednotlivé alternatívy podstupené hodnoteniu, ktoré zanalyzuje vhodnosť resp. nevhodnosť jednotlivých riešení pre danú historickú budovu.

Kľúčovým pre zrealizovanie je podrobná analýza vývoja historických systémov vykurovania, ktoré boli v riešených objektoch prítomné. Nie však iba pre realizáciu alternatívy 1, no vedomosť o polohách komínov, dimenziách rozvodov, spôsobu odvodu spalín či prívodu čerstvého vzduchu je ťažisková aj pre alternatívu 2 a 3, pokiaľ je zámerom maximálne možné zachovanie autenticity materiálu a diela.

Príspevok sa preto ťažiskovo venuje základným východiskám, ktorých dva primárne parametre sú:

- Vývoj historických vykurovacích systémov
- Vývoj meštianskeho domu (ako predmetu následnej prípadovej štúdie)

Súčasný spôsob vykurovania ako ďalší z parametrov pre realizáciu prípadovej štúdie nie sú predmetom tohto príspevku.

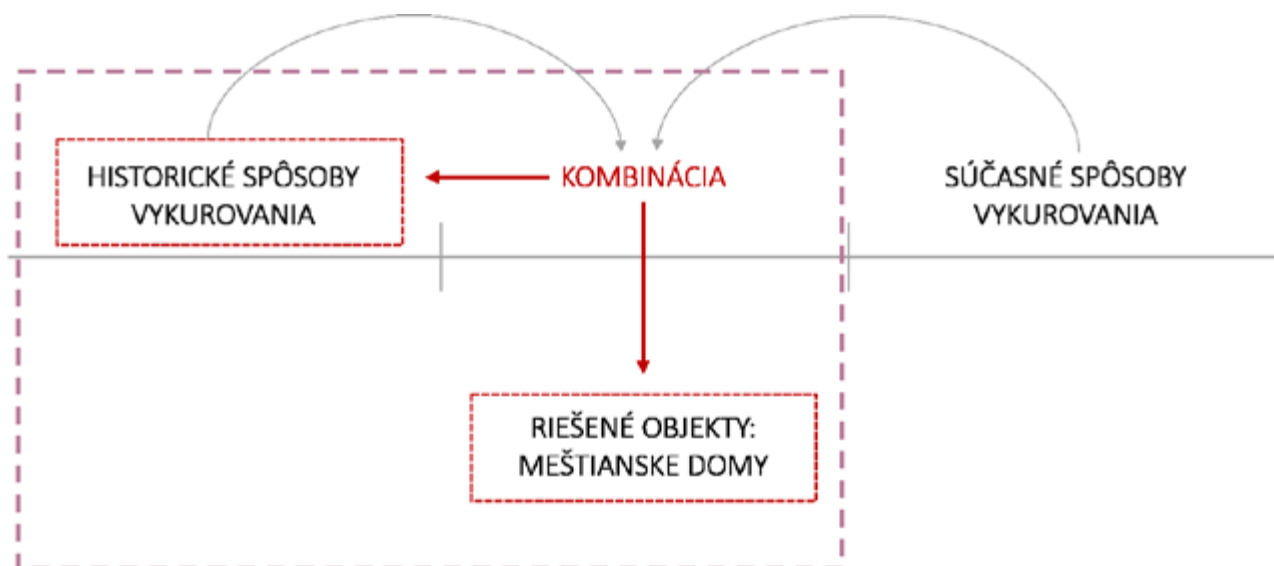


Figure 1: Schematické zobrazenie hlavného predmetu príspevku (Zdroj: Ema Ruhigová)

2. Parameter vývoja riešeného typologického druhu – meštianskeho domu

2.1 Dispozičný vývoj

Vývoj meštianskeho domu sledujeme od obdobia stredoveku, kedy začínajú v blízkosti výhodných priestorov (ako napríklad obchodná cesta, trhovisko, námestie) vznikať tzv. *Vežové domy*. Tieto domy boli príznačné svojou vertikálnosťou, kde ich obyvatelia (zvyčajne z vyšších vrstiev) mali obytné miestnosti na vyšších podlažiach. V rámci pozemku mohli byť osadené

kdekoľvek, zväčša však boli súčasťou kamenného oplotenia po obvode parcely. Tieto domy spolu s vysokými kamennými múrmi predstavovali účinný obranný mechanizmus v obdobiach častých vpádov a nepokojov.

Komorový dom sa začína rozvíjať v období gotiky, kedy prichádza tlak bývania „v bezpečí“ hradieb aj zo strany strednej triedy obyvateľstva. Tento typ domu sa nijako významne neodlišoval od roľníckeho domu, ktorý pozostával z tzv. trojpriestoru – svetlej izby zo strany ulice, zadnej miestnosti (komory) zo strany dvora a čiernej kuchyne, ktorá sa nachádzala medzi nimi. Táto poloha bola výhodná najmä z toho hľadiska, že čierna kuchyňa slúžila zároveň aj ako zdroj tepla pre obe z miestností.

Prejazdový dom sa podobne začína objavovať už v období gotiky. Jeho hlavným znakom je opakujúci sa trojpriestor, a susediaci prekrytý prejazd do dvora. Hlavnou výhodou je rozšírenie podlažnej plochy na hornom (teplejšom a suchšom) podlaží. Tento typologický druh je jasným predchodcom *Sieňového domu*, ktorý z hľadiska prevládajúcej výrobnjej a predajnej funkcie na prízemí možno považovať za prvý „plnohodnotný“ meštiansky dom. Sieň vzniká prepojením prejazdu a svetlej izby a otvára sa smerom k ulici.

Dom s výškou - bol jednoduchším typom prejazdového domu, dispozične obohatený o znížené podkrovie- výšku, ktorá slúžila na uschovávanie obilia alebo tovarov, citlivých na vlhko. Výška sa mohla nachádzať aj nad dvorovým krídlom. Na fasáde sa prejavovala radom malých okien, ktoré osovo nadväzovali na okná obytného podlažia. Mali vonkajšie okenice alebo kované záklopky z vnútornej strany s mechanickým zatváraním z úrovne dvora. [1]

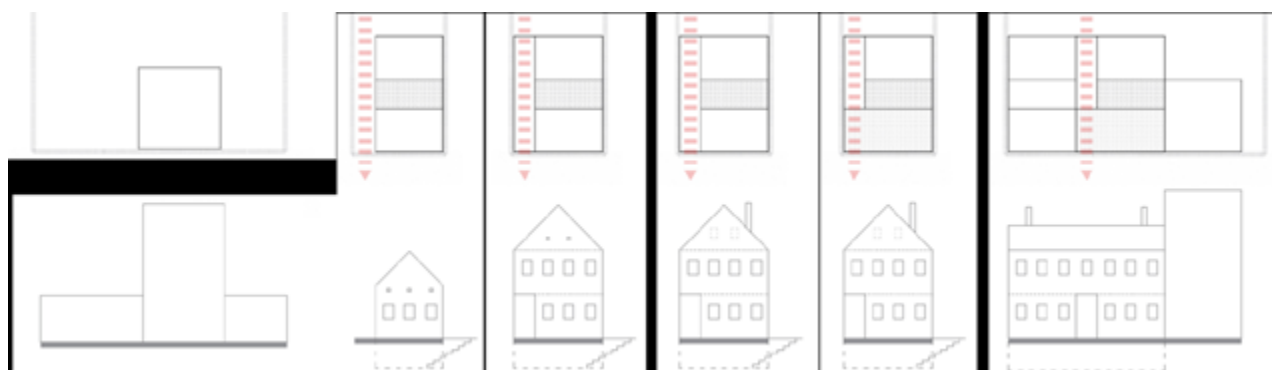


Figure 2: Vývojové etapy meštianskeho domu z hľadiska dispozície. Zľava: Vežový dom, Komorový dom, Dom s prejazdom, Dom s prejazdom s výškou, Sieňový dom (s výškou) a zrkadlenie typologického trojpriestoru vzájomným prepájaním (Zdroj: Ema Ruhigová)

2.2 Prejavy vykurovacieho systému na fasáde

Prvky výtvarnosti meštianskych domov z jednotlivých období z hľadiska skúmanej témy nehrajú zásadnú úlohu, preto tomuto aspektu nebude v príspevku venovaný veľký rozsah a ani dôraz. V tejto rovine je potrebné uvedomiť si vertikálnu dispozíciu meštianskeho domu, ktorá s prítomnosťou charakteristického znaku meštianskeho domu – obchodnej/výrobnej funkcie na prízemí – „odsúva“ funkciu bývania na vyššie podlažia. Vonkajšie znaky odrádzajúce jednotlivé obdobia bude potrebné v najbližšej fáze výskumu skúmať najmä z hľadiska absencie komína (prítomné sú dymné otvory na fasáde), polohy a výšky komína (a teda zdroja tepla), počtu komínov, jeho materialitou a formou. Rovnako bude potrebné overiť prítomnosť vykurovacieho telesa v obchodných/výrobných priestoroch, ako aj formy jeho prevádzkovania (sklad na tuhé palivo atď.)

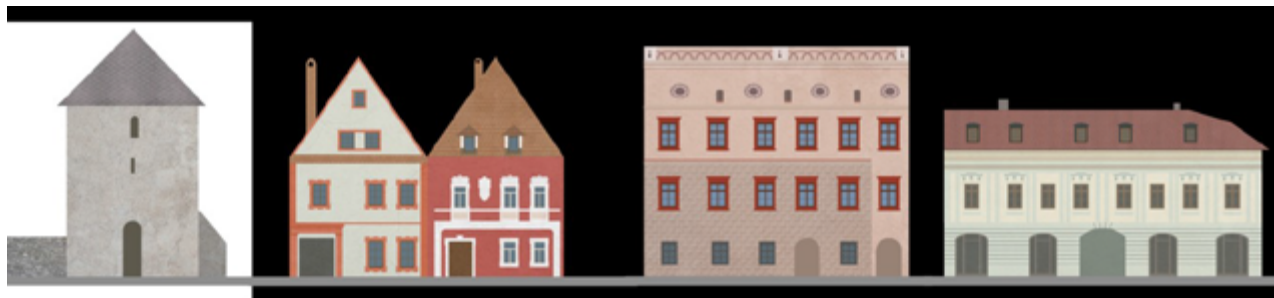


Figure 3: Vývojové etapy meštianskeho domu z hľadiska dispozície. Zľava: Gotický vežový dom (Křížany, 1. polovica 14. storočia), Gotický meštiansky dom (Bardejov), Renesančný dom s atikou (Banská Bystrica, Thurzov dom), barokový meštiansky dom (Nitra, Štefániková ul.) (Zdroj: Ema Ruhigová)

3. Parameter historického vývoja vykurovania

Snaha o vytvorenie a udržanie tepla v obytných miestnostiach bola aktuálna už od nepamäti. Za „vlajkové“ vykurovacie systémy môžeme pokojne považovať aj otvorený oheň pod prístreškom v období praveku. Cieľom tohto príspevku však nie je podrobné mapovanie vykurovacích systémov v priereze dejín, ale zúžené skúmanie obdobia prítomnosti meštianskych domov – od stredoveku, cez gotiku, renesanciu, barok, až po klasicizmus.

Keďže meštianske domy patria do skupiny profesionálnej architektúry, schémy nezohľadňujú všetky vtedajšie spôsoby vykurovania využívané aj v ľudovej architektúre. Aj keď v jednotlivých obdobiach predstavovali vykurovacie systémy svojou formou širokú škálu, pre účely tohto príspevku budú spomenuté iba ich „najvyvinutejšie podoby“.

3.1 Obdobie gotiky

Obdobie gotiky so sebou v rámci vykurovania prináša čiastočné uzatváranie otvoreného ohňa v miestnosti do kozubu, takže sú spaliny odvádzané komínom priamo nad strešnú rovinu (na rozdiel od ľudovej architektúry, kde pretrváva prítomnosť spalín v hornej časti miestnosti, prípadne v medzistrešnom priestore). Komínom sa síce zvyšuje komfort a hygienický štandard obytných miestností, no uniká až 80% tepla. Preto si spoločnosť si v tomto období začala uvedomovať potrebu zefektívnenia vykurovacieho telesa – otvorený oheň sa začal obostavovať tehľami a kameňmi, aby aj po vyhasnutí ohňa krb sálal teplo.

Neskôr (na hradoch od 14. storočia, v bežných domácnostiach od 16. storočia) sa začali objavovať prvé kachle, ktoré sa vyvinuli z postupného zväčšovania „obmurovaného-akumulačného“ objemu v okolí krbov a snahy eliminovania spalín z otvoreného ohňa do miestnosti.

Nedá sa však nespomenúť, že v období gotiky stále prevládajú aj systémy, ktoré vieme definovať aj ako tie, kde „absentuje“ komínové teleso. Tieto systémy predstavujú spôsoby vykurovania, ktoré boli používané aj v jednoduchších formách bývania. Na fasáde vieme sledovať dymné otvory, ktorými boli spaliny z otvoreného ohňa vyvádzané do exteriéru. Jeden zo spôsobov je aj odvádzanie spalín do strešného priestoru pomocou tzv. dymníka.

3.2 Obdobie renesancie

Snahou o udržanie tepla v miestnosti boli v roku 1600 prvýkrát inštalované vodorovné prepážky situované nad kachlovým telesom. (Tieto opatrenia boli neskôr technologicky ďalej vyvíjané až do patentovania Franklinových kachiel so zvislými prepážkami za kachlami z roku 1744). Podobným princípom fungovali aj tzv. renesančné „stĺpcové kachle“, ktoré slúžili ako koncový prvok po celej

výške miestnosti, čím bol zabezpečený maximálny akumulčný objem a dostatok priestoru pre trasovanie spalín vo vodorovnom smere.

3.3 Obdobie baroka

Za predchodcu parných vykurovacích sústav môžeme považovať systém zavedený v roku 1710-1714 v Letnom sídle Petra Veľkého v Petrohrade. Tento systém nebol až tak účinný, no hlavným pokrokom bolo umožnenie vykurovania viacerých miestností z jedného zdroja tepla.

Teplonosné médium - vodná para - umožňovala jednoduchú konštrukciu obsahujúcu utesnenú nádobu na vodu, ktorá je pripojená na rozvody. Zdrojom tepla sa stáva centrálny bojler, ktorý teplo distribuuje prostredníctvom rozvodov. V tomto prípade sa rozvody zároveň stávajú koncovým prvkom.

3.4 Obdobie klasicizmu

Rozšírenie centrálného vykurovania bolo úzko späté so zmenami v používaní palív. V domácnostiach sa nezvyklo centrálné vykurovať tuhým palivom z dôvodu potreby intenzívnej prevádzky. Joseph Nason (USA) vytvoril primitívny radiátor v roku 1841, ktorý bol patentovaný ako radiátor na vodnú paru. V roku 1855 San Galli vytvoril v podstate dnešnú podobu radiátorov.

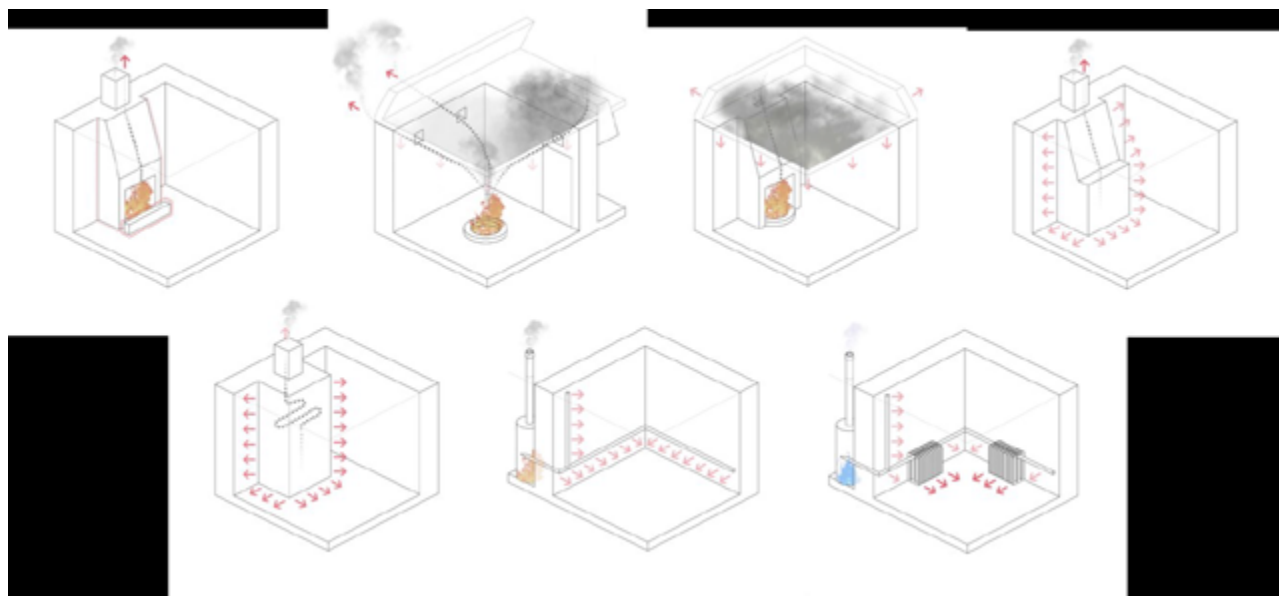


Figure 4: Vývojové etapy vykurovania. Hore zľava: obdobie gotiky-kozub s komínom, obdobie neskorej gotiky- odvod spalín dymnými otvormi, odvod spalín do strešného priestoru, kachle. Dole zľava: obdobie renesancie- zefektívnenie kachiel vnútornými prepážkami, obdobie baroka- prvé rozvody na distribúciu teplonosnej látky, obdobie klasicizmu- prvé radiátory, plyn. (Zdroj: Ema Ruhigová)

4. Zhrnutie

Nasledujúci obrázok prepája oba východiskové parametre (vývoj meštianskeho domu a vývoj vykurovania) a tým vytvára východiskovú situáciu pre ďalšie skúmanie témy formou prípadovej štúdie jednotlivých období. Od obdobia vrcholnej gotiky až po klasicizmus tak môžeme jasne čítať

princíp vykurovania, ako aj samotnej dispozično-prevádzkovej formy domu, čo otvára možnosti na ďalšie prehľbovanie témy.

| EPOCHA | STREDOVEK | neskorý: GOTIKA | | | NOVOVEK | RENASANČIA | BAROK | KLASICIZMUS |
|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------|--------------|------------------|------------------|--------------|-------------|
| OBDOBIE | VYCHOLNÝ GOTIKA | 13. storočie | 14. storočie | 15. storočie | 16.-18. storočie | 17.-18. storočie | 18. storočie | |
| VYKUROVANIE | | | | | | | | |
| PREJAVY SYSTÉMU NA FASADE | | | | | | | | |
| DISPOZIČNÝ VÝVOJ | | | | | | | | |
| SPRSTREDOVATEĽ | | | | | | | | |
| ODVOD SPALÍN | | | | | | | | |

Figure 5: Zhrnutie vývojových etáp v období od stredoveku po klasicizmus pre vykurovanie a vývoj meštianskeho domu na území Slovenska (Zdroj: Ema Ruhigová)

Literatúra

- [1] GREGOROVÁ, J.–GREGOR, P. a kol.: Prezentácia architektonického dedičstva II., Vydavateľstvo Perfekt, Bratislava 2008
- [2] VODRÁŽKA, P.: Dejiny stavby miest, Vydavateľstvo Meritum, Bratislava, 2001
- [3] MUNIAK, D.: Radiators in Hydronic Heating Installations. Structure, Selection and Thermal Characteristics. 2017

Richard ŠIMEK¹; Vojtech CHMELÍK¹; Monika RYCHTÁRIKOVÁ²
Študijný program: TKPS, 3. ročník

STANOVENIE HLADINY HLUKU POZADIA VO VEĽKÝCH ÁTRIÁCH SO ZNÁMYMI AKUSTICKÝMI VLASTNOSŤAMI A FUNKCIOU MIESTNOSTI

DETERMINATION OF BACKGROUND NOISE LEVELS IN LARGE ATRIA WITH KNOWN ACOUSTIC PROPERTIES AND ROOM FUNCTION

Abstract

One of the major acoustic problems that can be identified in large halls, such as atriums or covered shopping malls, is the continuous and unpleasant background noise created by the long reverberation time. The level of background noise caused by internal sound sources depends on the one hand on the activity performed in these spaces and on the other hand on the acoustic properties of the room. The noise present in the room can be measured relatively easily with sound level meters and then evaluated by using a statistical noise analysis, e.g. histogram of noise levels. The function, and the activity performed in the atrium, plays an important role in the analysis of acoustic comfort, and without information about the time changes of the source signal, parameters such as L_{90} or L_5 cannot be successfully predicted. In this article, several typical audio signals (such as human steps, speech, music, ventilation, etc.) are synthesized and auralized through Odeon software and evaluated in a parametric atrium study, followed by a statistical analysis of auralized sounds. Correlation between room acoustic parameters and room activity was also calculated, and an estimate of background noise levels L_{99} , together with an equivalent sound pressure level L_A , eq.

Kľúčové slová

Priestorová akustika, hluk v pozadí, štatistické hladiny hluku, veľké haly, átriá

1. Úvod

Akustický komfort vo veľkých halách, kde sa zhromažďuje veľa ľudí, je veľmi zložitým problémom, ktorý závisí od niekoľkých objektívnych a subjektívnych faktorov. Výzvou je nájsť koreláciu medzi touto dvojicou spôsobov hodnotenia hluku, tak aby bolo možné navrhnúť vhodný parameter pre akustickú predikciu vhodných akustických podmienok, a zosumarizovať poznatky do usmernení, ktoré by pomohli architektom pri ich navrhovaní. Napriek mnohým, už existujúcim akustickým parametrom, ešte neexistuje vyhovujúci parameter, ktorý by reprezentoval akustický komfort. Mnohé otázky sa zvyčajne objavujú v prípadoch projektov obnovy historických átrií, ktoré patria k národným alebo regionálnym pamiatkam [1,2].

Bežná prax pri príprave usmernení pre priestorovú akustiku je stereotypne založená na meraní, výpočte alebo simulácii času dozvuku. Čas dozvuku je dobrým meradlom pri hodnotení tried, posluchárni alebo aúl, a to vďaka ich vysokej korelácii s indexom distribúcie reči (STI) a jasnosťou (C_{50}), ktorá zohľadňuje pomer medzi skorými a neskorými odrazmi zvuku a tým aj

¹ richard.simek@stuba.sk; vojtech.chmelik@stuba.sk; jarmila.husenicova@stuba.sk;

² monika.rychtarikova@kuleuven.be;

zrozumiteľnosť reči. V kombinácii s ostatnými parametrami, ktoré možno nájsť v ISO 3382, hodnota času dozvuku, poskytuje primeraný opis akustických vlastností priestoru, ktoré sú vhodné na navrhovanie koncertných sál, oper alebo divadiel [3]. Pokiaľ však ide o viacúčelové miestnosti, často sa tu stretávame s problémom vysokej alebo nepretržitej hladiny hluku v pozadí, pričom tento hluk môže byť ovplyvnený nielen celkovým časom dozvuku, ale aj tvarom miestnosti a rozmiestnením zvukovo pohltivých plôch v interiéri.

Okrem toho nepríjemné akustické expozície nie sú vždy spojené s extrémne vysokými hladinami hluku. Zvukové odrazy v miestnostiach s veľkými objemami prichádzajú z okolitých povrchov z relatívne veľkých vzdialeností, ktoré nie sú dostatočne silné na to, aby priamo zvýšili maximálnu hladinu hluku. V dôsledku Lombardovho efektu [4] však odrazy nepriamo zvyšujú hladinu hluku, ako je znázornené v [5]. V skutočnosti je typicky pozorovateľným problémom prítomnosť nepretržitého hluku v pozadí zvukovej expozície [6,7].

Tento článok je preto založený na parametrickej štúdiu, ktorá ukazuje, ako sa menia štatistické hladiny hluku, ako sú L_{90} , L_{95} a L_{99} , pri rôznej aktivite, v priestoroch s rôznym objemom a vlastnosťami zvukovo pohltivých povrchov.

2. Opis modelovej situácie

2.1 Opis modelového átria

Východiskom pre túto štúdiu bolo átrium kaštieľa v obci Halič. Dané átrium bolo postavené v barokovom štýle. Pôvodne to bol otvorený vonkajší priestor s trávnatou vegetáciou uprostred a kamennými chodníkmi. V roku 2016 sa zmenil účel priestoru a átrium zakryla zasklená strecha a trávu na zemi nahradili mramorové kamene. Vytvoril sa tak vnútorný priestor vhodný pre jedáleň hotela a tranzitný priestor hotelovej lobby.



Obrázok 1. Ľavý obrázok (Variant A): pôvodné átrium pred renováciou; stredný obrázok (Variant B): renovované átrium pokryté fóliami ETFE; pravý obrázok (Variant C): átrium po renovácii zakryté sklom.

Najprv bol preskúmaný vplyv renovácie (sklenená strecha a tvrdá podlaha) na známe akustické parametre (ako je čas dozvuku, hladina akustického tlaku a jasnosť zvuku), ktoré sa predikovali pomocou simulačného modelu v softvéri Odeon. Neskôr bola vytvorená tretia alternatíva, v ktorej sa ETFE používa ako strešný, krycí materiál namiesto skla a na steny sa umiestnila porézna omietka a porovnávala sa s prvými dvoma prípadmi (obr. 1). Tento článok sa venuje hlavne problémom akustického komfortu pri rôznych okrajových podmienkach, ako sú zmeny objemu a zvukovo pohltivých vlastností vnútorných povrchov.

2.2 Opis parametrickej štúdie

Aby sa preskúmali a porovnali problémy s akustickým komfortom vo veľkých miestnostiach oproti malým miestnostiam, vykonala sa parametrická štúdia, ktorá pozostávala z 3 rôznych objemov a 3 rôznych alternatív zvukovo pohltivých vnútorných povrchov, a teda spolu 9 rôznych alternatív. Objem 1 zodpovedá pôvodnému átriu, druhý objem je modelovaný s dvojnásobnými rozmermi v porovnaní s pôvodným átriom, a teda s $8 \times$ väčším objemom a $4 \times$ väčšou plochou vnútorných povrchov. Objem 3 je modelovaný s polovičnými rozmermi pôvodného objemu, to znamená s $8 \times$ menším objemom a $4 \times$ menšou plochou vnútorných povrchov. Všetky simulované prípady sú zhrnuté v tabuľke 1.

Tabuľka 1 – Zoznam simulovaných alternatív

| Objem (m ³) | Variant A (original) | Variant B (ETFE) | Variant C (glass) |
|-------------------------|----------------------|------------------|-------------------|
| 8767 | Alt.1A | Alt.1B | Alt.1C |
| 70100 | Alt.2A | Alt.2B | Alt.2C |
| 1097 | Alt.3A | Alt.3B | Alt.3C |

Tri varianty (A, B a C) majú rôzne zvukovo pohltivé vlastnosti vnútorných povrchov. Variant A predstavuje situáciu pred rekonštrukciou, je bez strechy a obsahuje trávny porast v centre nádvorja a kamenné chodníky. Variant B obsahuje strechu vyrobenú z fóliového strešného systému ETFE, mierne poréznu omietku na stenách a mramorovú podlahu. Pri variante C je uvažovaná presklená strecha, mramorová podlaha a neporézna omietka s náterom .

3. Opis experimentov

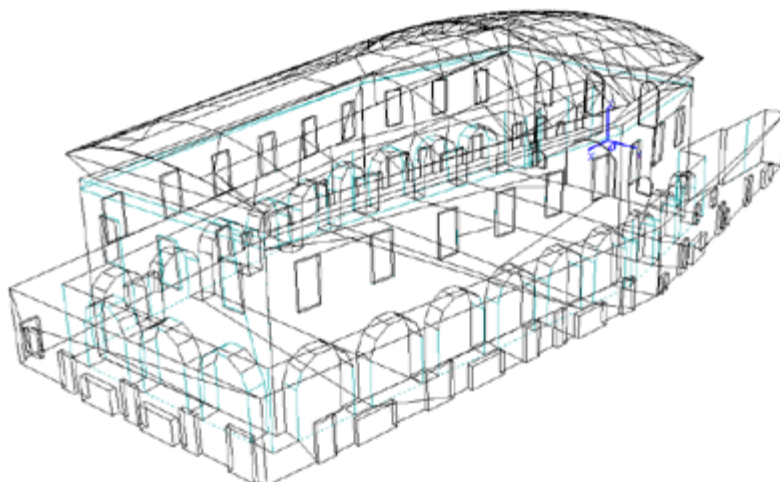
Dva hlavné experimenty, popísané v tomto článku (založené na simuláciách v simulačnom softvéri Odeon) boli uskutočnené pre 9 stanovených prípadov (alternatív). Trojrozmerný simulačný model je znázornený na obrázku 3.

Pokus 1 bol vyhotovený s nastavením pre jeden zdroj zvuku a 20 prijímačov rozmiestnených v mriežke s rozmermi 3×3 m v časti átria. Následne boli zaznamenané podrobné informácie o distribúcii hladiny akustického tlaku G (dB) v každej alternatíve. Poloha zdroja zvuku a prijímačov v troch rôznych objemoch je znázornená na obrázku 4.

V experimente 2 bola vybraná jedna pozícia prijímača spolu so súborom zvukových zdrojov simulujúcich peší pohyb cez strednú časť átria s dvoma rôznymi rýchlosťami. Zdroje zvuku simulujú polohy zdrojov impulzného zvuku (jednotlivé kroky osoby, neskôr syntetizované na nepretržitý zvuk chôdze). Pozícia medzi prijímačom a zdrojmi bola rovnaká vo všetkých variantoch. (Obrázok 5)

3.1 Simulačný model

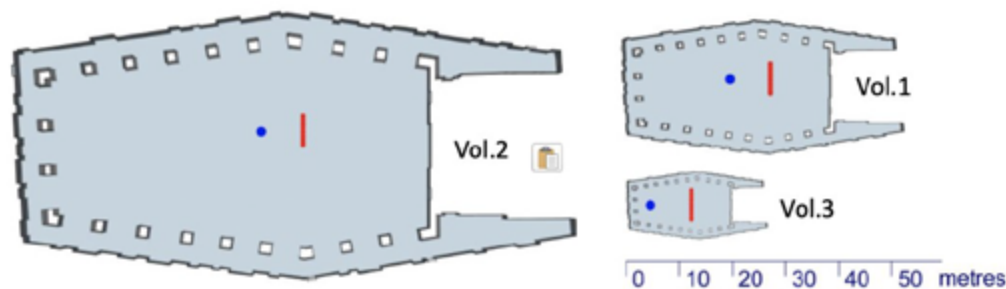
Simulačný model pre tento experiment bol pripravený v softvéri Google Sketchup a zjednodušený pre potreby akustického modelu Odeon tak, aby zahŕňal iba povrchy prichádzajúce do kontaktu s akustickými vlnami reprezentovanými lúčmi v simulačnom softvéri. Softvér používaný na simuláciu priestorovej akustiky je založený na hybridnej výpočtovej metóde. Táto metóda kombinuje použitie metódy zrkadlenia zdroja pre skoré odrazy zvuku a špeciálnu metódu odrazu lúčov s pokročilým algoritmom rozptylu na simulácie odrazov vyšších rádov [8].



Obrázok 3. Simulačný model, 3D perspektívny pohľad.



Obrázok 4. Pôdorysný pohľad na 3 átriá v rôznych modelovaných rozmeroch (Objem 1, 2 a 3) so znázorneným umiestnením všesmerového bodového zdroja zvuku (čierny trojuholník) a rozmiestnením prijímačov (modré bodky), v Experimente 1.



Obrázok 5. Pôdorysný pohľad na 3 átriá v rôznych modelovaných rozmeroch (Objem 1, 2 a 3) so znázorneným umiestnením prijímača (modrá bodka) a zdrojmi zvuku (kroky), znázornené ako červený pás, v Experimente 2.

4. Výsledky a analýzy

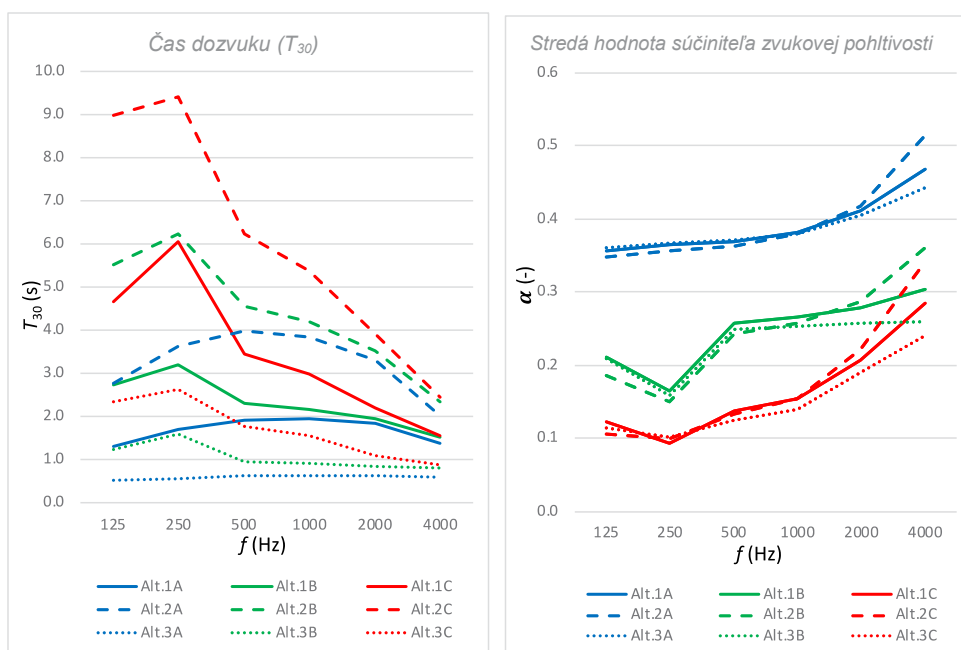
4.1 Experiment 1

Výsledky času dozvuku a stredného súčiniteľa pohltivosti zvuku α (-) sú znázornené na obrázku 6.

Obrázok 6 vľavo zobrazuje veľké odlišnosti medzi rôznymi alternatívami spôsobené rozdielmi v objeme a pohltivosti. Na obrázku 6 vpravo vidíme priemerný súčiniteľ pohltivosti zvuku α , vypočítaný ako vážený priemer. Teoreticky by mala byť stredná hodnota α rovnaká

pre každý variant (A, B alebo C), pretože je nezávislá od objemu, s výnimkou vysokých frekvencií, v ktorých pohltivosť vzduchu prispieva k času dozvuku. Tieto trendy sú jasne pozorovateľné.

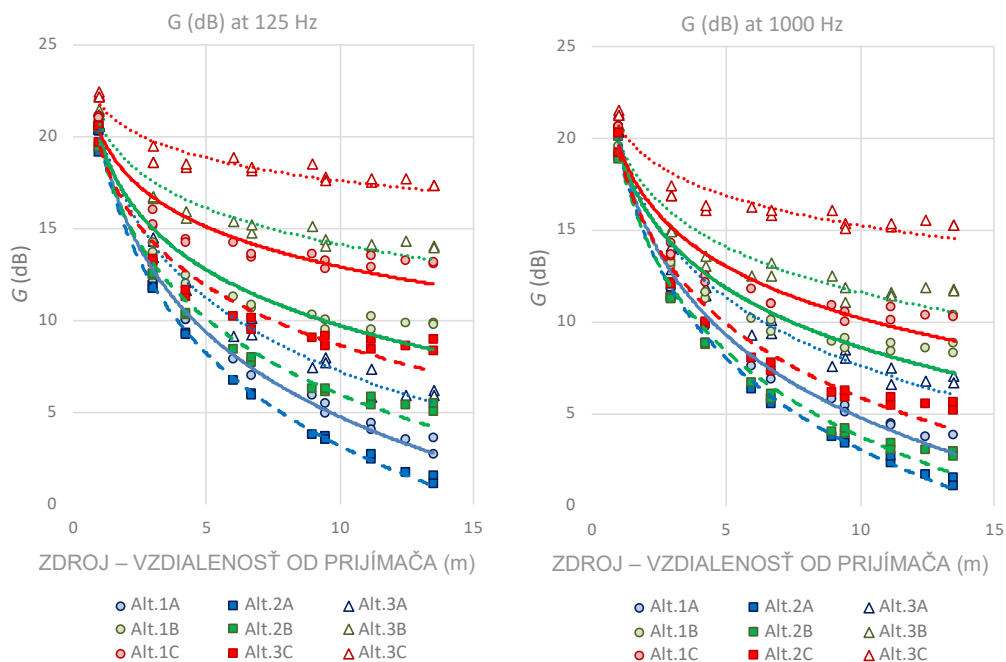
Čas dozvuku je jednoznačne najdlhší vo veľkej miestnosti s najmenšou pohltivosťou a najkratší čas dozvuku sa logicky prítomný v malom objeme (obj. 3) v situácii bez strechy. Tiež je možné pozorovať, že v každom objeme je doba dozvuku pri 4000 Hz takmer rovnaká. Napríklad pri vysokých frekvenciách bol vplyv objemu vyšší ako stredný súčiniteľ pohltivosti zvuku α (-) vnútorných povrchov.



Obrázok 6. Zhrnutie priemerného T_{30} pre všetky simulované impulzné odozvy a stredný súčiniteľ pohltivosti zvuku α (-) vnútorných povrchov pre všetky simulované varianty.

POZNÁMKA 1 * Farby predstavujú absorpčné vlastnosti povrchov. Modrá sa používa na zobrazenie pôvodných alternatív pred renováciou bez strechy; v zelenej sú alternatívy s ETFE fóliami a poréznu omietkou; a červená farba predstavuje varianty so zasklenou strechou a neporéznu omietkou s náterom. Objem 1 (pôvodný objem miestnosti) je zobrazený plnou čiarou; prerušovaná čiara predstavuje prípady s objemom 2 (veľký objem); a bodkovaná čiara zobrazuje výsledky pre malý objem 3.

Ďalším dôležitým parametrom v priestorovej akustike je distribúcia hladiny akustického tlaku v miestnosti. V tomto článku uvádzame výsledky prostredníctvom parametra *sila zvuku* G (dB) pre dve oktávové pásma, 125 Hz a 1 000 Hz (obr. 7). Najhlučnejšie miestnosti podľa predikovanej hladiny zvuku by mali byť malé miestnosti (Obj. 3) so strechou so zasklením a neporéznu omietkou, ktoré sú o 5 dB hlučnejšie v porovnaní so situáciou s ETFE a poréznu omietkou. Hustota odrazov tu zohráva významnú úlohu. Je zaujímavé, že hladiny zvuku v malej miestnosti bez strechy (vo vzdialenosti 14 m od zdroja zvuku) sú pri prítomnosti strechy menej „hlučné“ ako hladiny zvuku v objeme 1 (pôvodný objem). Najnižšiu hladinu akustického tlaku možno sledovať pri veľkom objeme (Obj. 2), kde v Alt.2A (alternatíva bez strechy) sa takmer uplatňuje teória voľného zvukového poľa. Veľké rozmery átria neprispievajú významne k zvýšeniu sily zvuku G vo väčších vzdialenostiach.



Obrázok 7. Grafické znázornenie poklesu hladiny akustického tlaku, vyjadrené prostredníctvom parametra sila zvuku G (dB) so zväčšujúcou sa vzdialenosťou medzi všesmerovým zdrojom zvuku a prijímačmi.

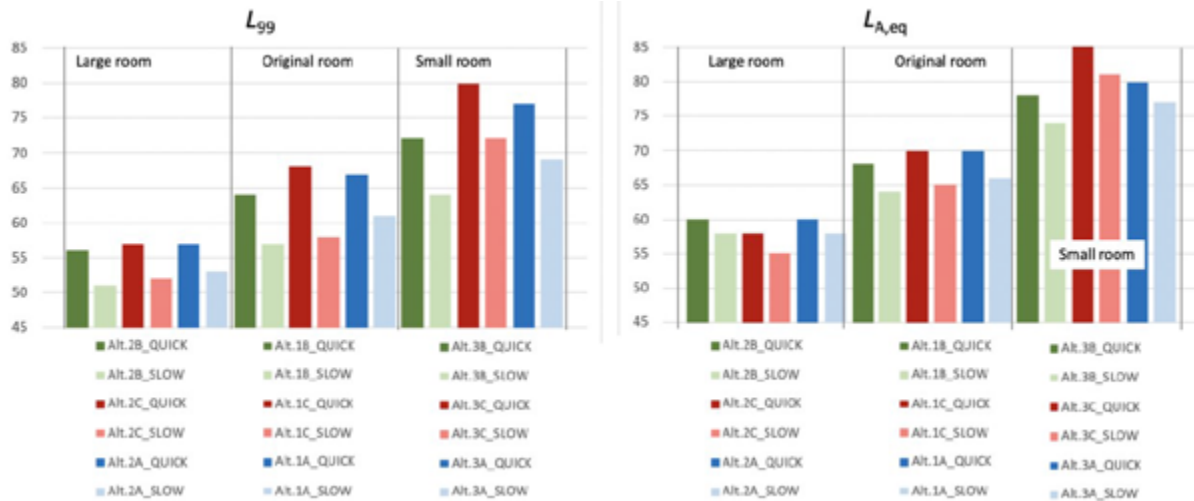
Dáta v obrázku 7 sú opísané nasledovne, krúžky zobrazujú údaje pre objem 1 (pôvodný objem), štvorčeky sa používajú na zobrazenie výsledkov objemu 2 (veľký objem) a trojuholníky predstavujú malý objem (obj. 3). Rovnaká logika farieb a zastúpenia čiar sa používa pre trendové krivky, tak ako na obrázku 6 (viď. POZNÁMKA 1).

4.2 Experiment 2

Experiment 2 sa uskutočnil s cieľom lepšie porozumieť problémom s akustickým komfortom. Tu sa zameriavame na výskumnú otázku: „Ako ovplyvňujú ľudské kroky v átriu celkovú ekvivalentnú hladinu akustického tlaku ($L_{A, ekv}$) na jednej strane a kvázi kontinuálny hluk pozadia spôsobený dlhým dozvukom, reprezentovaný (v našom experimente) štatistickou hladinou hluku L_{99} , na strane druhej.“

Simulácie osôb kráčajúcich vo vzdialenosti asi 10 m od prijímača boli realizované pre 9 rôznych alternatív (3 objemové prípady) a sú znázornené na obrázku 5. Diskrétné kroky boli simulované a auralizované s dvoma rôznymi rýchlosťami a to ako rýchle a pomalé kroky. Na auralizovaných vzorkách bola uskutočnená štatistická analýza hluku. Výsledky na obrázku 8 sú uvedené ako spriemerované hodnoty medzi ľavým a pravým uchom.

Na prvý pohľad bolo možné pozorovať určité nezrovnalosti pri porovnaní $L_{A, ekv}$. S časom dozvuku a distribúciou hladiny akustického tlaku, to však možno ľahko vysvetliť. Parametre $L_{A, eq}$ a $L_{A, 99}$ boli vypočítané na základe binaurálneho auralizovaného zvuku, zatiaľ čo hodnoty T_{30} a G boli vypočítané zo všesmerového prijímača. Binaurálna simulácia, v ktorej zvukové odrazy prichádzajú zo stien, je pre skutočného počúvajúceho silnejšia ako zvuk zo zeme alebo stropu v dôsledku tieniacich efektov hlavy (definovaných pomocou funkcie HRTF - Head related transfer function). Preto by mohli ovplyvniť konečné auralizované výsledky, najmä ak sa vlastnosti steny a vzdialenosť prijímača líšia od alternatívy k alternatíve.



Obrázok 8. Výsledky $L_{A,eq}$ a L_{99} vypočítané z auralizovaného zvuku.

5. Záver

Na základe vykonaného experimentu 1 a 2 možno dospieť k záveru, že medzi objektívnym hodnotením (podľa normy ISO 3382) pomocou všesmerového reproduktora a všesmerového prijímača môže byť rozdiel v porovnaní s binaurálne simulovanými zvukmi. HRTF by mohla mať vplyv na presnosť výsledkov, a vyriešiť problémy s komfortom v miestnostiach, pretože lepšie reprezentuje vnímanie poslucháča.

V miestnostiach s rôznymi veľkosťami a vnútornými povrchmi sa niekedy vytvára rovnaká hladina hluku v pozadí. Vynára sa otázka, či by ich ľudia považovali za podobné (vo vzťahu k miere v akej ich hluk obťažuje).

Pri návrhu / vývoji vhodného parametra alebo kritéria pre hodnotenie akustického pohodlia v átriách, ktorý by mal vyjadrovať mieru pohodlia spojenú s kvázi kontinuálnym hlukom pozadia spôsobeným vnútornými zdrojmi (napríklad chodiacimi ľuďmi), je jednoznačne potrebný vhodný posluchový test.

Použitá literatúra

1. GREGOROVÁ J, KIABOVÁ E, VARGIC L, KVASNICOVÁ M., *The importance of the pre-project setup and documentation for the restoration of the monuments*. In proc. of ATF 2018. Leuven 2018, s.46-55.
2. VOJTEKOVÁ E., *Presklené Átriá. (Atria covered by glass)*. Vydavateľstvo STU, Bratislava 2016.
3. ISO 3382: Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1.
4. LOMBARD É., *Le signe de l'élévation de la voix, Annales des Maladies de L'Oreille et du Larynx* (1911) s. 37,101-119.
5. ZELEM, L., Analysis of the noise impacts on verbal communication and its modulations. *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. Bratislava 2016, s. 545-552.
6. YANG W, KANG J., *Acoustic comfort evaluation in urban open public spaces* 66, 2005, s.211-229.
7. RYCHTÁRIKOVÁ M, CHMELÍK V, URBÁN D, VARGOVÁ A., Acoustic conditions in the atrium of Slovak philharmonic. *Procedia Engineering* (2016) 155, 2016, s. 464-471
8. RINDEL J.H., The Use of Computer Modeling in Room Acoustics. *Journal of Vibro Engineering* 3(4) s.41-72 Paper of the International Conference BALTIC-ACOUSTIC.

Alexander Topilin

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb¹

SPÔSOBY REDUKCIE EFEKTU MESTSKÉHO TEPLOTNÉHO OSTROVA

METHODS OF REDUCTION OF URBAN HEAT ISLAND EFFECT

Abstract

The term "heat island" describes built up areas that are hotter than nearby rural areas. This phenomenon was first defined and intituled in the late 40s after micro-climatological survey by W.G.V.Balchin and Norman Pye, but the effect have been detected and documented for nearly 200 years. The annual mean air temperature of a city with 1 million people or more can be 1–3°C warmer than its surroundings. In the evening, the difference can be as high as 12°C. Heat islands can affect communities by increasing summertime peak energy demand, air conditioning costs, air pollution and greenhouse gas emissions, heat-related illness and mortality, and water pollution. The reaction from architects and urbanists to this new challenges is becoming the topic of the present. We have to come up with inovative and progressive methods for local solutions of global problems.

Kľúčové slová

Teplotný ostrov, verejný priestor, modro-zelená infraštruktúra, klimatická zmena

1. Nadväznosť na predchádzajúci výskum

V predchádzajúcom výskume som sa ťažiskovo sústredil na podobu verejných priestorov z obdobia komunistického režimu v Československu najmä po uznaní tzv. 4% zákona, inak známeho aj ako Hlava V, ktorý mal za priamy cieľ estetickú kultiváciu verejných priestorov realizáciou výtvarných diel, ktoré vznikali ako priama súčasť vtedajšieho obrovského stavebného rastu. S myšlienkou kultivovania verejného priestoru sa mal kultúrne vzdelávať aj obyvateľ mesta. Verejný priestor mal však v minulosti odlišnú podobu o akú sa usilujú architekti a urbanisti v súčasnosti. Verejné priestory mali prezentovať ideály a propagandu komunistického režimu, mali slúžiť rôznym oficiálnym stretnutiam a ceremóniám, absentovala možnosť aktívne využívať verejný priestor, absentovali neformálne zákutia plné zelene. Tak ako sa politicko-spoločenské pomery v krajinách menia, tak sa značne mení aj podoba a charakter verejných priestorov. Práve verejné priestory priamo odzrkadľujú pravú podstatu režimu, situácie a kontext v ktorom vznikajú. Pre totalitný režim boli charakteristické veľké spevnené, chladné a neosobné plochy verejného priestoru.

Z hľadiska adaptácie verejného priestoru podľa súčasných predstáv je potrebné komplexne riešiť formy a metódy revitalizácie, do ktorej nám vstupuje aj zachovanie urbanistických a architektonických kvalít pôvodného návrhu, identita priestoru, sebauvedomenie a zakotvenosť v čase, kultúrna kontinuita priestoru, ale aj prispôsobovanie sa novým výzvam ako je práve reakcia na klimatické zmeny.

V procese mapovania výtvarných realizácií z obdobia druhej polovice 20. storočia v meste Trenčín som sa oboznamoval s podobami a charakterom diel, výrazom verejného priestoru, s ktorým vytvárajú neoddeliteľný celok. Po vytvorení databázy všetkých diel realizovaných v mestskom prostredí mesta Trenčín som narazil na fakt, že výtvarné realizácie často naberali aj iné významy a

¹ Alexander, Topilin, Ing. arch., Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava – Staré Mesto – Bratislava - Slovensko

funkcie ako len tie estetické a propagandistické. Často ide o prvky mobiliáru, oplotenia, verejného osvetlenia, detských preliezok, vodných plôch a fontán.

Po hlbšej analýze som narazil na fakt, že väčšina realizovaných fontán brodísk alebo iných vodných plôch nie je v prevádzke, alebo bola ich funkcia pozmenená. Prevádzku narušujú najmä faktory priamo spojené s návrhom a realizáciou umeleckého diela, napríklad problémy s cirkuláciou vody, avšak rovnakou mierou prispieva k celkovej degradácii aj slabá údržba, či ekonomické problémy spojené s obnovou vodnej plochy a jej ďalšou prevádzkou.

Ako lokálne riešenie na globálny problém som vytvoril hypotézu, ktorá sa zaoberá obnovou vodných plôch z obdobia 2. Polovice 20. storočia, ako jednou z metód tvorby modro – zelenej urbánnej infraštruktúry, ktorá má potenciál redukovať dopad hroziacich klimatických zmien. Hroziace globálne klimatické zmeny kladú zvýšené nároky na schopnosť miest adaptovať sa na ich nepredvídateľné dopady. Voda a zeleň majú potenciál fungovať ako ochladzovací činiteľ mesta – dokážu vyrovnávať extrémnu teplotu vyvolávanú tzv. efektom teplotného ostrova.



Obr.1: Gottwaldovo námestie v Bratislave (Zdroj:www.ba.foxy.sk)

2. Aktuálnosť problematiky na Slovensku

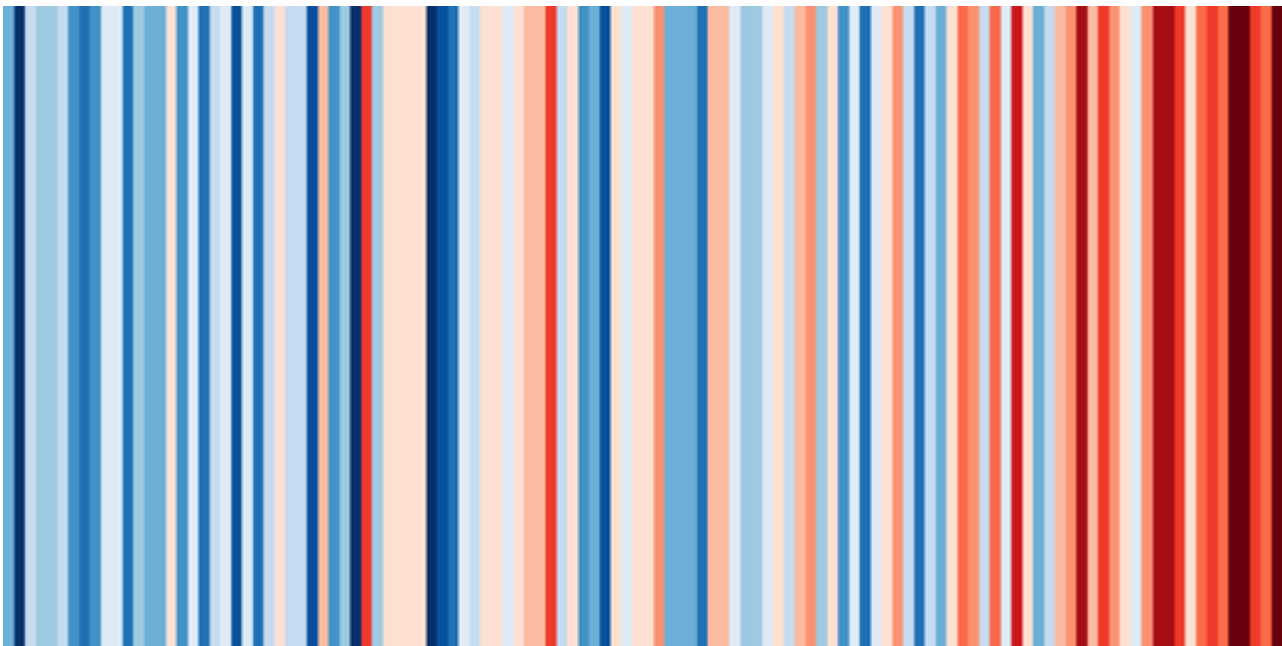
Na Slovensku sa pozorovaniu a meraniu venuje SHMÚ, komplexné meranie teploty uskutočnil 12. júla od 7:00 do 19:00 vo výške 1,8 až 2,0 metre nad zemou. Miesta boli vybrané cielene tak, aby odrážali diverzitu prostredia v Bratislave, ako napríklad rôzne typy zástavby, mestská zeleň, les, voda či diaľnica. Výsledky ukazujú pomerne veľké rozdiely teploty vzduchu na území mesta, ktoré dosahovali až štyri stupne Celzia.

V prípade meraní v centre je najteplejšou lokalitou historické centrum mesta, najmä Primaciálne námestie. Chladnejšie už bolo na neďalekom Šafárikovom námestí, kde je viac zelene a blízkosť Dunaja. Merania potvrdili ochladzujúci efekt zelených a vodných plôch v meste. Napríklad park

SNP v Líščom údolí bol takmer o dva stupne Celzia chladnejší ako neďaleká zástavba v Karlovej Vsi. Okolie jazera Kuchajda bolo približne o jeden stupeň chladnejšie ako neďaleká zástavba na Riazanskej ulici.

S „mestským tepelným ostrovom“ sa človek stretáva vtedy, ak z dediny či predmestia prichádza do mesta. Hoci sa zemepisne neocitol v inom pásme, napriek tomu sa akoby výrazne oteplilo. Nejde len o pocitovú zmenu teploty, ale merateľne zvýšenú horúčavu, ktorá sa v mestských oblastiach na rozdiel od odľahlejších zón akumuluje výraznejšie. [1]

Na Slovensku sa od roku 1881 do roku 2017 zvýšila priemerná teplota o 1,73 stupňa Celzia, zmena od roku 1901 je zobrazená na jednoduchej grafike "show your stripes", ktorá vizuálne reprezentuje nárast teploty na Slovensku.

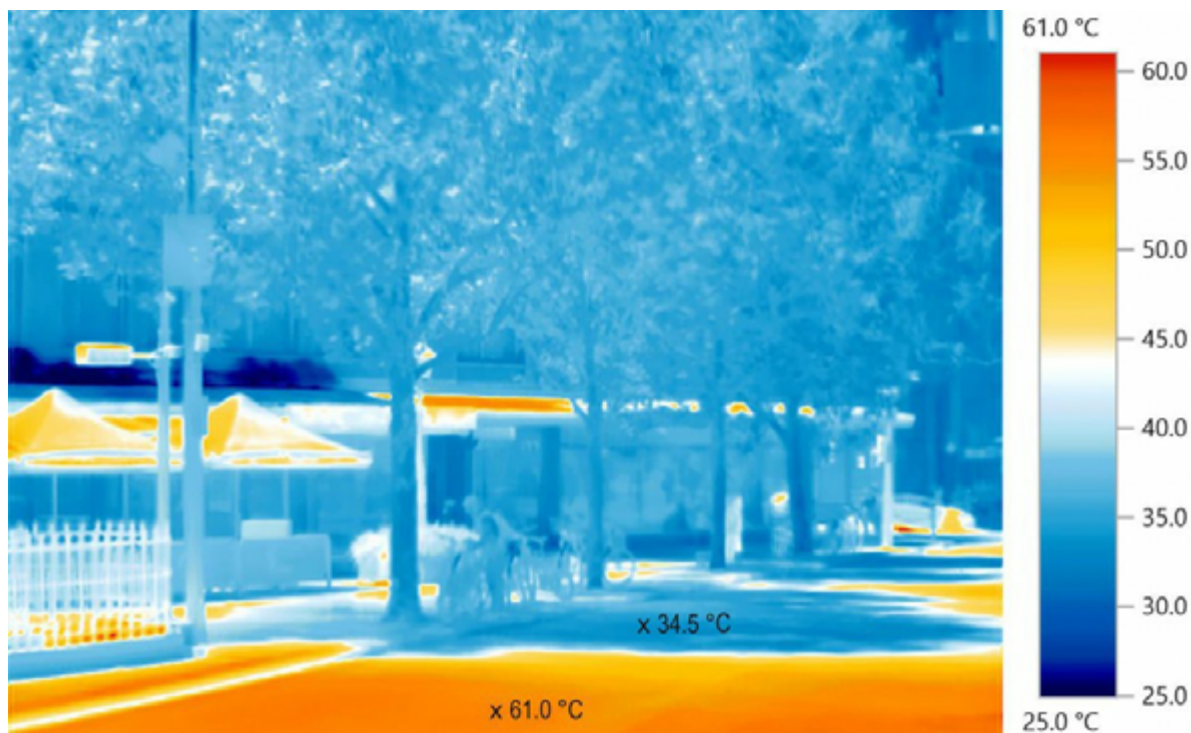


Obr.2: Show your stripes - Slovakia - 1901 - 2018
(Zdroj: www.showyourstripes.info)

2.1 Definovanie pojmu mestského teplotného ostrova

Pojem mestský ostrov tepla (angl. urban heat island, v skratke UHI) bol prvýkrát použitý v 40. rokoch minulého storočia, pričom označuje vyššiu teplotu vzduchu v meste oproti okolitej vidieckej krajine (Balchin a Pye, 1947). Môžeme ho tiež definovať ako pozitívnu teplotnú anomáliu medzi centrom mesta a jeho okolím. (Dobrovolný a kol. 2012). [3]

Teplotný rozdiel medzi mestskými tepelnými ostrovmi a okolím môže vo veľkomestách s cca jedným miliónom obyvateľov cez deň predstavovať 3 - 8°C, v noci aj 12°C. Toto navyšuje spotrebu energie potrebnú na chladenie vzduchotechnikou, čím sa ovzdušie ešte viac otepluje. Dostávame sa do začarovaného kruhu. Architekti, urbanisti, projektanti a authority na mestských úradoch preto v poslednej dobe usilujú o zmiernenie efektu mestských tepelných ostrovov, nastavujú priority a vytvárajú stratégie za účelom zabezpečenia udržateľnej budúcnosti nielen obyvateľov miest, ale aj ľudstva ako takého.



Obr.3: Efekt UHI zachytený termo kamerou - Melbourne, 2027 (Zdroj: www.e2designlab.com.au)

2.2 Výskyt javu a príčiny jeho vzniku

K aspektom, ktoré výrazne navyšujú teplotu v mestách, patrí nedostatok zelených plôch, využitie materiálov s nulovou vodopriepustnosťou, spevnené plochy z vysokoemisívnych materiálov, masívna výstavba, nevhodná urbanistická štruktúra znižujúca rýchlosť vetra v uliciach.

Rozdiel teploty je najvýraznejší najmä v zástavbe s veľkým podielom spevnených plôch umelými povrchmi (asfalt, betón, dlažby, atď.), ktoré majú výrazne odlišné podmienky bilancie žiarenia ako okolitá vidiecka krajina a prirodzená krajina (lesy, lúky). Umelé povrchy majú schopnosť akumulácie tepla počas dňa a postupného uvoľňovania počas obdobia negatívnej bilancie žiarenia, teda večer a v noci, preto je efekt pri meraniach výrazne intenzívnejší.

Veľkému podielu umelých povrchov je nepriamo úmerné pomerne malé zastúpenie vegetácie, ktorá dokáže zadržiavať vodu a má vďaka evapotranspirácii ochladzujúci efekt. Zväčšenie plochy umelých povrchov a prevaha vertikálne orientovaných povrchov vedú k zvyšovaniu množstva pohlteneho krátkovlnného žiarenia dopadajúceho na povrch Zeme. Uzavreté priestory medzi budovami obmedzujú dlhovlnné vyžarovanie a najmä v nočných hodinách znižujú stratu tepla. Ďalšie faktory prispievajúce k vzniku UHI sú veľká hustota dopravy v mestách či emisie z priemyslu a s tým súvisiace znečistenie ovzdušia. [4]

UHI je často viazaný na jasné slnečné dni alebo dni s malou oblačnosťou, bezvetrím alebo len slabým prúdením vzduchu počas leta (radičný typ počasia). Jeho výskyt však môže byť zaznamenaný v ktorúkoľvek ročnú dobu, v denných alebo nočných hodinách v závislosti od miestnej tepelnej bilancie.

2.3 Následky spojené s efektom UHI

Neporézne povrchy v mestách nedovoľujú zrážkovej vode vsiaknuť sa do pôdy, prispievajú k odtoku vôd z privalových dažďov do kanalizácií, do riek a ďalej do morí. Ubúda tak podzemných

vôd, vznikajú záplavy a v nadväznosti na nich tiež erózie pôdy. Dochádza k znečisteniu vody chemickými látkami (pesticídy, zvyšky pohonných hmôt). Vyššie teploty zapríčiňujú tvorbu prízemného ozónu a premieňajú klímu na lokálnej aj širšej úrovni. Dochádza k vlhkostným zmenám a narušeniu ekosystému. Sú tvorené tzv. mestské kaňony - na komunikáciách lemovaných vyššou zástavbou buď vzduch stojí, alebo sa vytvára nežiaduci prievan, ten víry zdvíhajúci sa prach a navyšuje koncentráciu oxidu uhličitého. Sálanie UHI ďalej spôsobuje vyššiu zrážkovú činnosť nad mestskými oblasťami, častejší výskyt hmly a v zimnom období zintenzívňuje prítomnosť smogu. [5]

Transformované teplotné pomery mezoklímy miest, a topoklímy konkrétnych typov zástavby výrazne negatívne vplyvajú na tepelný komfort človeka. [5] Mestské tepelné ostrovy znižujú kvalitu života obyvateľov, majú vplyv na ich zdravotný stav a celkovú vitalitu. Dochádza k poškodzovaniu termoregulačného systému človeka, ktoré veľakrát vyvoláva kardiovaskulárne a respiračné ochorenia. V neposlednom rade znižujú kvalitu života v mestách a majú vplyv na celkové zdravie a vitalitu ich obyvateľov. Rovnako negatívne vplyva aj na biodiverzitu prostredia. Rastliny a živočíchy sa nedokážu adaptovať na prostredie a tak nastáva pokles alebo úplná strata bohatej biodiverzity.

3. Metódy redukcie efektu mestského teplotného ostrova

3.1 Spôsoby architektonicko stavebné

Základným spôsobom, ktorým môžeme úspešne redukovať nežiadúce vplyvy sprevádzajúce klimatickú zmenu a vznikajúci efekt teplotného ostrova v urbanizovanom prostredí miest sú najmä spôsoby stavebné. Či už pri novo navrhovanej mestskej zástavbe, prípadne pri jej obnove, je potrebné dbať na základné zásady, ktoré dopomáhajú redukcii spomínaného efektu. Na výstavbu ciest aj budov sú používané prevažne materiály s nízkou odrazivosťou (s nízkym albedom, ktorý je pomerom odrazeného elektromagnetického žiarenia k množstvu dopadajúceho žiarenia. Vďaka tomu je v nich kumulované teplo pochádzajúce zo Slnka. V mestách je samozrejme okrem slnečného tepla produkované aj teplo "umelé" pochádzajúce z domácností a iných prevádzok pri zvýšenej potrebe energie na chladenie. Napomáhať môže navrhovanie svetlých spevnených povrchov a striech, ktoré odrazia žiarenie naspäť do atmosféry.

3.2 Spôsoby technologické a materiálové

Inovatívny spôsob využitia materiálov môže predstavovať napríklad pridávanie reflexných agregátov do betónu, prípadne adaptácia tzv. piatej fasády zástavby. Tmavé strechy sa pri jasnej oblohe a teplote okolitého vzduchu 37° C ohrejú aj na 80° C, zatiaľ, čo biele len na 44° C. Biela strecha tak svojou schopnosťou odraziť veľkú časť slnečného žiarenia znižuje náklady na chladiace zariadenia o 10 – 15 %. [5] Používa sa napr. biely náter z elastomérených materiálov (pružný materiál, napr. kaučuk), ale je možné využiť aj kovovú krytinu svetlej farby. Strechy sa dajú riešiť aj ako zelené strechy, ktoré regulujú prehrievanie okolia rovnako ako aj iná zeleň v mestách, a teda zadržáva zrážkovú vodu a spätne jej dovoľuje prirodzené vyparovanie do atmosféry a odoberá tak teplo z okolia. Zelené strechy objekt tienia, izolujú a chladia a tak znižujú energiu potrebnú na chladenie technológiami.

Strechy alebo obvodový plášť budov je možné tiež tzv. adiabaticky chladiť (tzn. bez vonkajšieho príspevku energie). Jedná sa o jednoduchý odparovací systém, ktorý má za účel ochladenie vzduchu. Mesto je možné hladiť tiež s pomocou prirodzeného vetra a to v prípade, ak sú budovy vhodne usporiadané. [5]

3.3 Tvorba modro-zelenej infraštruktúry

Zeleň má v akejkoľvek forme významný vplyv na eliminácii UHI, no rovnako napomáha celkovej rovnováhe mikroklímy. Poskytuje tieň, svojim spektrom poskytuje priestor pre rozvoj biodiverzity a má priaznivé účinky na kvalitu ovzdušia. Kvalita vzduchu sa komplexne vyjadruje indexom AQI, ktorý vyhodnocuje obsah škodlivých látok z dopravy, prašnosť, vlhkosť a teplotu.

Zohráva takisto ústrednú úlohu v boji proti zmene klímy poskytovaním ochrany proti povodňam a iným negatívnym účinkom meniacich sa poveternostných podmienok. Napríklad neporušené zátopové oblasti zohrávajú dôležitú úlohu pri zmiernovaní povodní tým, že uchovávajú vodu a pomaly ju prirodzene uvoľňujú späť do potokov a riek. Lesy pôsobia ako zachytávače uhlíka a zabraňujú erózii pôdy. Mokrade absorbujú znečisťujúce látky a zlepšujú kvalitu našich zásob sladkej vody.

Efekt mestských tepelných ostrovov je nižší v oblastiach, kde sú prítomné vnútrozemné vodné útvary. Rieky a jazerá v mestách dodávajú do priestoru čerstvý vzduch, oddeľujú jednotlivé tepelné polia a celkovo znižujú všetky tepelné sálenia v mieste. Umelé vodné prvky sú zaradené do tzv. modrej infraštruktúry. Ochladzujú okolie aj na miestach, kde sa nenachádzajú prírodné vodné útvary. Do umelých vodných prvkov vieme zaradiť aj fontány, bazény a brodiská, ktoré vznikli v období komunistického režimu. Tieto diela sa často nachádzajú v epicentrách kumulácie extrémnych teplôt v mikroklíme mesta. Obnovou vodných plôch do pôvodnej funkcie vieme ekologicky pracovať so zadržiavaním zrážok v prostredí, s procesom evapotransportácie a zachovaním prirodzeného cyklu vody, ktorá by v procese funkcie vodných plôch a vyparovania značne ochladzovala svoje okolie.



Obr.4: Tvorba modro-zelenej mestskej infraštruktúry pri obnove verejného priestoru námestia Skander Square v Tirane od architektov 51N4E (Zdroj: www.51N4E.com)

Literatúra

- [1] BERECZ, A.: *Horúce dediny, žeravé mestá: Nové projekty si trúfajú ochladiť celé metropoly* [online]. News and media holding 2014 [Bratislava (Slovakia)] : Trend sk 2014 [cit. 2019-10-01]. Dostupné na internete : https://www.etrend.sk/ekonomika/horuce-dediny-zerave-mesta-nove-projekty-si-trufaju-ochladit-cele-metropole.html?itm_site=etrend&itm_template=article&itm_area=article&itm_module=related&itm_position=1
- [2] EURÓPSKA ENVIROMENTÁLNA AGENTÚRA, *Pozitívny vplyv čistejšieho ovzdušia na ľudské zdravie a zmenu klímy* [online]. EEA 2017/4 [Bratislava (Slovakia)] : 2017/4 spravodajcu EEA z 15. decembra 2017 [cit. 2019-10-01]. Dostupné na internete : <https://www.eea.europa.eu/sk/articles/cistejsi-zrak-koristi-zdravju-ljudi>
- [3] PECHO, J. et al.: *Vplyv charakteru zástavby na režim teploty vzduchu v Bratislave* [online]. SHMÚ Aktuality [Bratislava (Slovakia)] : SHMÚ 07/2018 [cit. 2019-10-01]. Dostupné na internete : <http://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=939>
- [4] SITA, *SHMÚ našiel najhorúcejšie miesto v Bratislave*, [online]. Trend sk [Bratislava (Slovakia)] : Trend sk 07/2018 [cit. 2019-10-01]. Dostupné na internete : <https://www.etrend.sk/ekonomika/shmu-nasiel-najhorucejsie-miesto-v-bratislave.html>
- [5] ŠIROKÁ, H.: *Mestské teplotné ostrovy* [online]. Istavebnictvo.sk [Bratislava (Slovakia)] : Istavebnictvo.sk 10 / 2018 [cit. 2019-10-01]. Dostupné na internete : <https://www.istavebnictvo.sk/clanky/mestske-tepelne-ostrovy>

Šimon Vacek¹

Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, 4. ročník

PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA APLIKÁCIE KAPILÁRNE AKTÍVNYCH TEPELNÝCH IZOLÁCIÍ AKO VNÚTORNÉHO ZATEPLENIA PRE HISTORICKÉ OBJEKTY

CASE STUDY OF APPLICATION OF CAPILLARY ACTIVE THERMAL INSULATION SYSTEMS USED AS AN INSIDE INSULATION FOR HISTORICAL BUILDINGS RETROFIT

Abstract

The trend of reducing energy consumption and the impact of human activities on nature, has increased significantly in recent years. This trend is also noticeable in civil engineering industry. It has an impact not only on new, but also on retrofitted or adapted buildings. Buildings such as monuments or historical buildings are also included in this category. It's necessary to realize that in case of these types of buildings, there are other values which are more important than technical parameters which should be considered. Mainly it is the social, artistic and craftsmanship value of these buildings. In connection with these types of buildings, the application of interior thermal insulation is usually suggested method to improve thermal parameters of walls and reduce energy consumption. This application of these systems appears to be the most appropriate way to preserve values mentioned above. Modern material research also takes place in this area and brings new developed materials such as capillary active isolation systems. These types of materials solve some of the problems connected with the addition of a thermal insulation on the inner side.

Kľúčové slová

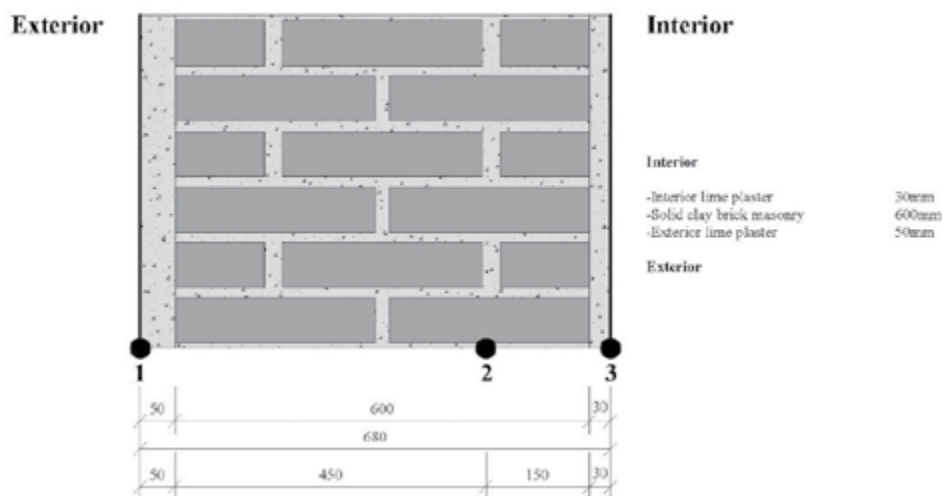
kapilárne aktívne tepelné izolácie, vnútorný tepelno-izolačný systém, historické budovy, adaptácia

1. Úvod

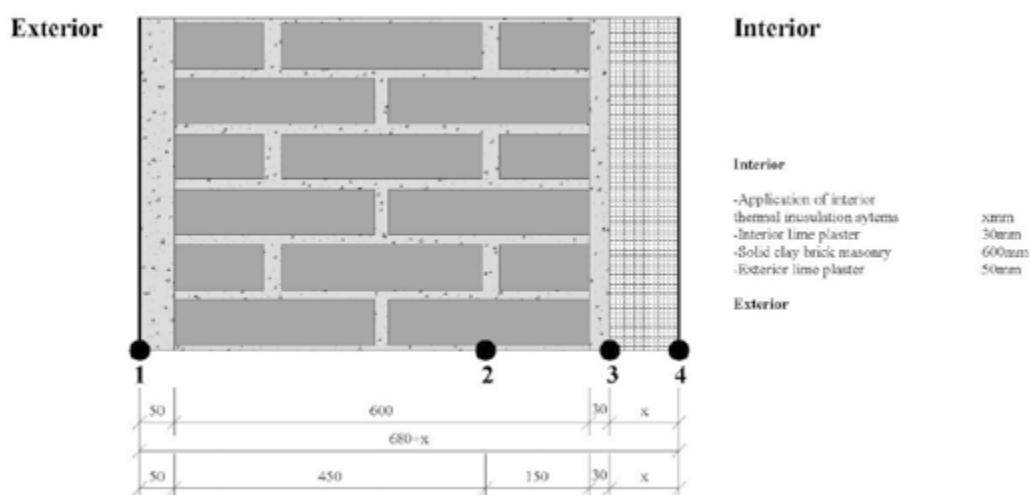
Tento článok slúži ako podklad pre experimentálne meranie, a na základe jeho výstupov sa bude postupovať pri výbere a overovaní dvoch vybraných systémov pri aplikácii v praxi. Hlavnou úlohou je sledovanie tepelno-vlhkostných charakteristík vyššie uvedených systémov vnútorného zateplenia [1,2,3] s aplikovaných na masívne obvodové murivo z plných pálených tehál (Obrázok 1 a 2). Prvý simulačný model (označenie OC) sa zaoberá výpočtom pôvodnej steny. Druhým modelom (označenie IP) je použitie systému s tepelnoizolačnou omietkou [4,5]. Ďalšou alternatívou je použitie systému s tepelným izolantom na báze kalcium-silikátových dosiek (označenie CS) [6,7]. Posledné dva prípady monitorujú použitie inovatívnych systémov izolácií. Jeden z nich je viacvrstvový systém založený na doskách z drevovláknitých dosiek (označenie WF), ktorý obsahuje minerálnu funkčnú vrstvu (Pavadentro®) (EP 1900884 A1, 2008). Posledným z nich je systém, ktorý využíva izolačnú dosku z tuhého polyuretánu, ktorá obsahuje hustý raster dier vyplnených kapilárne aktívnym materiálom (označenie IT)(IQtherm®) [8].

¹ Šimon Vacek, Ing. arch. Ing. KKPS, SvF STU BA. Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Modely



Obrázok 1. – Pôvodná stena s umiestnením monitorovacích pozícií (OC)



Obrázok 2. – Aplikácia systémov vnútorného zateplenia a umiestnenie monitorovacích pozícií (IP/CS/WF//IT)

Prvý z modelov je už vyššie spomínaná pôvodná stena. Fragment pozostáva z jednovrstvového muriva z plných pálených tehál a murovacej malty. Z oboch strán je murivo omietnuté vápennou maltou, ktorá sa v histórii používala primárne. Princíp aplikácie izolácie je založený na pridávaní vrstiev smerom dovnútra. Na záver sa vo všetkých modeloch uvažuje s finálnym náterom steny s difúzne otvoreným náterom. Všetky systémy okrem tepelno-izolačnej omietky sa vyznačujú tromi základnými komponentami. Tými sú: lepiaca vrstva, tepelnoizolačná doska, finálna pohľadová vrstva. Všetky systémy majú hrúbku 8 cm nakoľko táto hodnota technologicky definuje maximálnu priemernú hrúbku systémov tepelno-izolačných omietok nanášaných v dvoch cykloch.

Monitorovacie pozície uvedené na obrázkoch vyššie sledujú teplotu a relatívnu vlhkosť. Dva z nich ležia na povrchoch pôvodnej steny. Bod číslo dva je umiestnený 15 cm v priestore muriva od vnútorného líca. To z dôvodu, že v tomto mieste sa najčastejšie vyskytuje uloženie záhlaví drevených stropných trémov. Spomínané záhlavia sú senzitivné na zvýšenú vlhkosť a nevetraný priestor v okolí [9,10]. Nakoniec bod č. 4, ktorý je umiestnený na povrchu prídavného tepelno-izolačného systému. Bod č. 3 bude slúžiť ako spoločný ukazovateľ pre pôvodnú a obnovenú

konštrukciu. Tak isto sa v tomto bode pri aplikácii daných systémov uvažuje s kondenzáciou, preto je táto monitorovacia poloha podstatná.

3. Výpočtový model

Výpočtový model bol zhotovený prostredníctvom softwaru WUFI®Pro.5.3 (Wärme- und Feuchtetransport instationär – Transient heat and moisture transport – spriahnutý transport tepla a vlhkosti). Softvér je určený na jednodimenzionálne spriahnuté vedenie tepla a vlhkosti vo viacvrstvových komponentoch. Matematicko-fyzikálny základ položil Kunzel H.M vo svojej dizertačnej práci „Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters [11]. Softvér pri prenose tepla berie do úvahy: tepelnú vodivosť, tok obsahu energie (entalpie) prostredníctvom vlhkosti pri fázovej zmene, krátkovlnné slnečné žiarenie, nočné ochladzovanie dlhovlnným žiarením. Prestup tepla konvekciou na základe prúdenia vzduchu sa zanedbáva z dôvodu 1D simulácie. Pri transporte vlhkosti počíta s difúziou vodných pár a difúziou roztokov. Transport vodných pár konvekciou na základe prúdenia vzduchu sa tak isto zanedbáva. V prípade mechanizmov transportu kvapalnej vlhkosti berie výpočet do úvahy kapilárnu vodivosť a povrchovú vodivosť [12]. Fyzikálny základ kapilárne aktívnych tepelných izolácií a kapilárnej vodivosti je zhrnutý v uvedených zdrojoch [13,14,15].

Všetky vstupné dáta potrebné pre priebeh simulácie boli použité z dostupnej softvérovej knižnice. To hlavne z dôvodu, že daný článok má slúžiť ako podklad pre meranie. Tým pádom, nie sú známe žiadne materiálové charakteristiky a ani klimatické dáta získané meraním. Vstupy poskytované národnými normami ako STN 730540-3 [16] slúžia na zjednodušené výpočty a zďaleka nezahŕňajú všetky potrebné údaje pre tvorbu dynamických simulácií. Preto bolo možné použiť len údaje definujúce klímu vo vnútornom prostredí.

4. Vstupné údaje simulácie

Tab. 1 – Materiálové dáta

| Input material data | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|-----------|-------------------|--------------------------------|------------------------|-------------------------------|--|------------------------------------|-----------------------|--|
| Model type | Material | Thickness | Bulk density | Porosity | Specific heat capacity | Thermal conductivity dry 10°C | Water vapour diffusion resistance factor | Typical built-in moisture (RH 80%) | Free water saturation | Water absorption coefficient |
| | | m | kg/m ³ | m ³ /m ³ | J/(kg.K) | W/(m.K) | - | kg/m ³ | kg/m ³ | kg/(m ² .s ^{0.5}) |
| Original wall (OC) | Lime plaster exterior | 0,05 | 1600 | 0,3 | 850 | 0,7 | 7 | 30 | 250 | 3 |
| | Solid brick masonry | 0,6 | 1900 | 0,24 | 850 | 0,6 | 10 | 18 | 190 | 0,05 |
| | Lime plaster interior | 0,03 | 1600 | 0,3 | 850 | 0,7 | 7 | 30 | 250 | 3 |
| Insulation plaster (IP) | Original wall | | | | | | | | | |
| | Trass-lime heat insulation plaster | 0,08 | 611 | 0,76 | 802 | 0,06 | 6,9 | 63 | 412 | 0,2 |
| Calcium-silicate system (CS) | Original wall | | | | | | | | | |
| | adhesive - ytong multipor | 0,01 | 833 | 0,686 | 850 | 0,155 | 15,1 | 12,6 | 35 | 0,00309 |
| | insulation - ytong multipor | 0,08 | 115 | 0,96 | 850 | 0,04 | 4,1 | 8,1 | 197 | 0,013 |
| | finish - ytong multipor | 0,005 | 833 | 0,686 | 850 | 0,155 | 15,1 | 12,6 | 35 | 0,00309 |
| Woodfibre system (WF) | Original wall | | | | | | | | | |
| | adhesive | 0,01 | 1313 | 0,5 | 863 | 0,497 | 18,7 | 6,73 | 60,45 | 0,0052 |
| | insulation - pavadentro | 0,04 | 166 | 0,91 | 2100 | 0,043 | 10 | 27,4 | 909 | 0,12 |
| | functional - mineral layer | 0,005 | 1500 | 0,4 | 850 | 0,93 | 450 | 15,9 | 42 | 0,006 |
| | insulation - pavadentro | 0,04 | 166 | 0,91 | 2100 | 0,043 | 10 | 27,4 | 909 | 0,12 |
| | finish - lime plaster | 0,02 | 1600 | 0,3 | 850 | 0,7 | 7 | 30 | 250 | 3 |
| PUR+capillary active mat. system (IT) | Original wall | | | | | | | | | |
| | adhesive - remmers IQ fix | 0,01 | 1313 | 0,5 | 863 | 0,497 | 18,7 | 6,73 | 60,45 | 0,0052 |
| | insulation - remmers IQ therm | 0,08 | 44,5 | 0,98 | 1400 | 0,031 | 69 | 4,05 | 5,47 | 0,0027 |
| | finish - remmers IQ top | 0,005 | 465 | 0,81 | 1173 | 0,106 | 8,4 | 50,7 | 105,29 | 0,0135 |

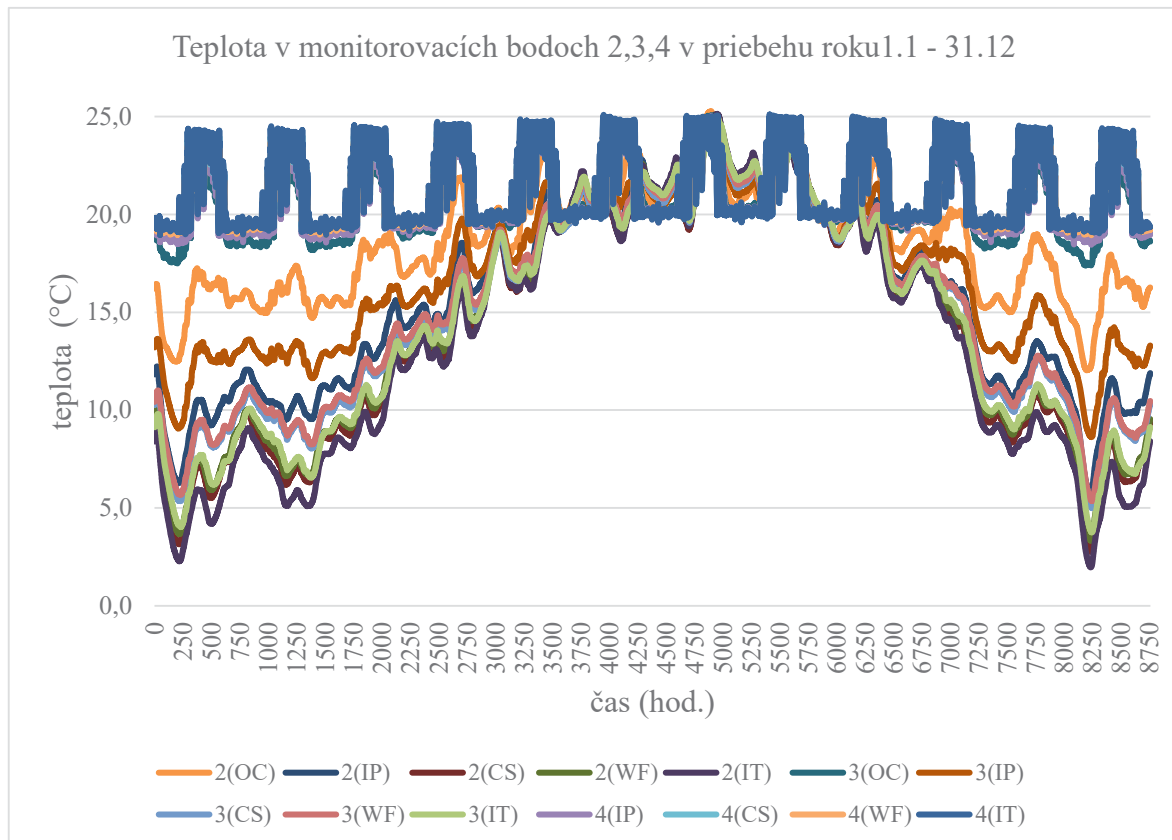
| Simulation input data | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| Type | Value |
| Outdoor climate (reference year) | Vienna - Austria |
| Indoor climate | according to EN 15026 |
| avg. int. temperature | 20-26°C |
| moisture load | normal |
| avg. int. relative humidity | 40-60% |
| heat/moisture/air change source | no |
| structure | wall |
| inclination | 90° |
| orientation | Nort |
| rain load | according to ASHRAE stan. 160 |
| building height | <10m |
| exposure category | medium |
| rain exposure factor | 1 |
| rain deposition factor | 0,5 |
| adhering fraction of rain | 0,7 (inclination dependent - wall) |
| exterior heat resistance | wind dependent |
| short wave radiation absorptivity | 0,4 (normal bright stucco) |
| ground short wave reflectivity | 0,2 (standard value) |
| interior heat resistance | 0,125 m ² .K/W |
| initial moisture in component | 80% initial rel. humidity |
| initial temperature in component | 20° |
| calculation period | 1.1 2019 - 1.1 2024 |
| time step | 1h |

Tabuľka 2. – Komplexné vstupné dáta

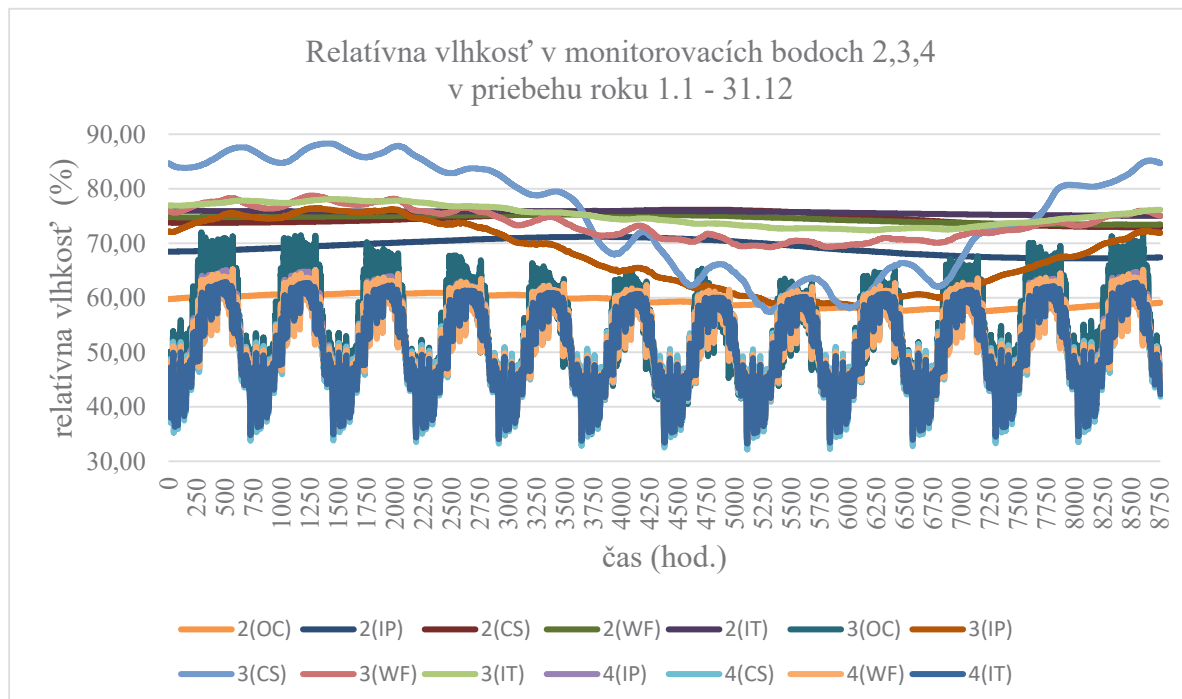
5. Výstupy simulácie

Tab. 3 – Výstupy

| | | Output data | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Model type | Material | heat flux left side (exterior) | heat flux left side (exterior) | moisture flux left side (exterior) | moisture flux left side (exterior) | total water content sim. start | total water content sim. | total water content min. | total water content max. | water content in layer sim. start | water content in layer sim. end | water content in layer min. | water content in layer max. |
| | | MJ/m ² | MJ/m ² | kg/m ² | kg/m ² | kg/m ² | kg/m ² | kg/m ² | kg/m ² | kg/m ³ | kg/m ³ | kg/m ³ | kg/m ³ |
| Original wall (OC) | Lime plaster exterior | 1288,87 | 1282,68 | -3,24 | -3,24 | 13,2 | 7,59 | 6,05 | 13,2 | 30 | 37,03 | 18,66 | 91,59 |
| | Solid brick masonry | | | | | | | | | 18 | 8,55 | 7,5 | 18 |
| | Lime plaster interior | | | | | | | | | 30 | 20,47 | 16,87 | 30 |
| Insulation plaster (IP) | Lime plaster exterior | 767,2 | 757,41 | -2,56 | 3,08 | 18,25 | 12,61 | 10,49 | 18,25 | 30 | 40,86 | 18,9 | 91,67 |
| | Solid brick masonry | | | | | | | | | 18 | 11,05 | 10,36 | 18 |
| | Lime plaster interior | | | | | | | | | 30 | 27,06 | 23 | 32,12 |
| | Trass-lime heat insulation | | | | | | | | | 63,09 | 39,04 | 29,37 | 63,09 |
| Calcium-silicate system (CS) | Lime plaster exterior | 511,6 | 500,3 | -2,09 | 0,29 | 14,04 | 11,65 | 9,47 | 14,89 | 30 | 43,18 | 19,03 | 92,29 |
| | Solid brick masonry | | | | | | | | | 18 | 13,09 | 12,13 | 18,21 |
| | Lime plaster interior | | | | | | | | | 30 | 34,97 | 23,35 | 43,87 |
| | adhesive - ytong multipor | | | | | | | | | 12,55 | 17,47 | 3,54 | 19,83 |
| | insulation - ytong multipor | | | | | | | | | 8,1 | 5,05 | 1,93 | 8,1 |
| | finish - ytong multipor | | | | | | | | | 12,55 | 2,46 | 1,84 | 12,55 |
| Woodfibre system (WF) | Lime plaster exterior | 540,19 | 528,33 | -2,22 | 1,11 | 16,09 | 12,77 | 11,02 | 16,98 | 30 | 43,04 | 19,02 | 93,17 |
| | Solid brick masonry | | | | | | | | | 18 | 13,06 | 12,32 | 18,04 |
| | Lime plaster interior | | | | | | | | | 30 | 28,31 | 26,64 | 36,15 |
| | adhesive | | | | | | | | | 6,73 | 5,91 | 4,85 | 11,11 |
| | insulation - pavadentro | | | | | | | | | 27,4 | 18,35 | 17,63 | 27,41 |
| | functional - mineral layer | | | | | | | | | 6,73 | 3,75 | 2,46 | 6,73 |
| | insulation - pavadentro | | | | | | | | | 27,4 | 18,22 | 11,91 | 27,4 |
| | finish - lime plaster | | | | | | | | | 30 | 19,35 | 16,65 | 30 |
| PUR+capillary active mat. system (IT) | Lime plaster exterior | 428,81 | 416,32 | -1,94 | 0,48 | 14,1 | 11,67 | 10,09 | 15,51 | 30 | 44,27 | 19,06 | 91,93 |
| | Solid brick masonry | | | | | | | | | 18 | 13,54 | 12,85 | 18 |
| | Lime plaster interior | | | | | | | | | 30 | 28,57 | 27,58 | 31,48 |
| | adhesive - remmers IQ fix | | | | | | | | | 6,73 | 6,19 | 5,42 | 7,63 |
| | insulation - remmers IQ therm | | | | | | | | | 4,05 | 3,11 | 2,64 | 4,05 |
| | finish - remmers IQ top | | | | | | | | | 50,7 | 16,97 | 13,47 | 50,7 |



Obrázok 3. – Teplota v monitorovacích bodoch 2,3,4 v priebehu posledného roku simulácie



Obrázok 4. – Relatívna vlhkosť v monitorovacích bodoch 2,3,4 v priebehu posledného roku simulácie

6. Záver a zhrnutie

Hlavný princíp funkcie kapilárne aktívnych izolácií je opísaný v [14]. Je potrebné spomenúť, že tieto systémy so sebou prinášajú aj isté riziká a tými sú samotné kapilárne vedenie, zvýšenie vlhkosti v izolante aj pôvodnom fragmente. Tento fakt vedie ku následnému zvýšeniu súčiniteľa tepelnej vodivosti a tým zníženiu celkového tepelného odporu konštrukcie. Následne odparovanie vlhkosti z izolačného systému vedie ku zvýšenej vlhkosti na vnútornom povrchu a aj vzduchu samotného.

Ďalší dôležitý fakt je, že samotná aplikácia týchto systémov je citlivá na správnu aplikáciu a zloženie systému. To znamená, že je potrebné striktné dodržiavať skladbu určenú výrobcom bez ďalších modifikácií, ktoré by mohli viesť k znehodnoteniu celého systému. Je taktiež vhodné rešpektovať odporúčania pre doplnkový sortiment, akým sú difúzne otvorené nátery, inštalácie prvky ako napríklad elektrické zásuvky a podobne.

Z numerických výstupov sa potvrdili vyššie uvedené známe fakty o aplikácii týchto systémov. Pre experimentálne meranie platia závery:

Ako systém s najvhodnejšou kombináciou profilov teploty, relatívnej vlhkosti a objemu vlhkosti jednotlivých vrstiev sa javí variant s označením (IT). Toto riešenie bude preferované pre pravouhlé tvary konštrukcií, kde sa tuhý tvar dosky nejaví problematický. Tým pádom jediným vhodným riešením pre oblé, zakrivené a nerovné povrchy bude aplikácia tepelno-izolačných omietkových systémov. To platí pre experimentálne meranie. V prípade reálneho použitia na budove je potrebné zvážiť viacero dôležitých faktov akými sú: ekologické aspekty použitých materiálov, cena, potrebná hrúbka, tepelný odpor systému, kompatibilita s pôvodnou stenou, hrúbka systému s ohľadom na zmenšenie vnútorného priestoru, potrebný tvar na ktorý sa má systém prispôbiť, vplyv na vnútornú klímu, pôvodný fragment a konštrukcie doňho zabudované. Nasledujúca tabuľka je zhrnutím hlavných výhod a nevýhod systému.

| Výhody | Nevýhody |
|--|--|
| -Umožňuje vysušovanie smerom do interiéru | -Zvyšovanie súčiniteľa tepelnej vodivosti z dôvodu transportu kvapalnej vlhkosti |
| -Umožňuje vyhnutie sa povrchovej kondenzácii | -Zvýšenie relatívnej vlhkosti na vnútornom povrchu konštrukcie |
| -Podobné vlhkosťné profily ako fragment pôvodnej steny (výhoda pri záhlaví drevených trávov) | -Zvýšenie relatívnej vlhkosti vzduchu v miestnosti |
| -systém možné použiť aj na vlhké murivo(až po určení podmienok aplikácie) | -Citlivé na dodatočnú modifikáciu |

Tabuľka 4. Hlavné výhody a nevýhody aplikácie kapilárne aktívny systémov tepelných izolácií ako vnútorného zateplenia

7. Podakovanie

Tento projekt je podporovaný Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky prostredníctvom grantovej schémy Slovenskej technickej univerzity v Bratislave pre podporu mladých výskumníkov číslo 1666.

8. Literatúra

- [1] Häupl P, Jurk K, Petzold H. 2003. Inside thermal insulation for historical facades. Research in Building Physics. Lisse: Swets & Zeitlinger; 463-469s.
- [2] Vereecken E, Roels S. 2016. Capillary active interior insulation: a discussion. Energy Efficiency and Comfort of Historic Building, Belgium, Brussel. 191-197s.
- [3] Scheffler G, Grunewald J. 2003. Material development and optimization support by numerical simulation for capillary-active inside insulation material. Research in Building Physics. Lisse: A.A. Balkema Publishers: 463-469s.
- [4] Barbero S et. al. 2014. Analysis on existent thermal insulating plasters toward innovative applications: Evaluation methodology for a real cost-performance. Energy and Buildings 77. ISSN 0378-7788. 40-47p.
- [5] Bianco I et. al. 2015. Thermal insulating plasters as a solution for refurbishment historic building envelopes: First experimental results. Energy and Buildings 95. ISSN 0378-7788. 96-91p.
- [6] Scheffler G. 2011. Hygric performance of internal insulation with light-weight autoclaved aerated concrete. Proceedings 5th International AAC Conference. Bydgoszcz, September 14-17. 323-336s.
- [7] Kreft O, Straube B, Schoch T. 2011. Internal thermal insulation with light weight autoclaved aerated concrete. 5th International Autoclaved Aerated Concrete Conference. Bydgoszcz, Poland, September 14-17. 251-256s.
- [8] Remmers IQ-Therm – The intelligent interior insulation – The unique capillary thermal insulation, [online], [14. 7. 2018]. http://www.remmers.co.uk/fileadmin/user_upload/brochures/interior_insulation/796_-_iqtherm/796_GB_iQ-Therm.pdf
- [9] Stopp H, Strangfeld P, Toepel T, Anlauff E. 2010. Messergebnisse und bauphysikalische Lösungsansätze zur Problematik der Holzbalkenköpfe in Aussenwänden mit Innendämmung (English version). Bauphysik 32(2): 61-72.
- [10] Morelli M, Svendsen S. 2013. Investigation of interior post-insulated masonry walls with wooden beam ends. Journal of Building Physics 36. ISSN 1744-2583. 265-293s.
- [11] Kunzel H. M. 1995. Simultaneous Heat and Mass Transport in Building Components : dissertation thesis. Stuttgart : Fraunhofer institut für bauphysik. ISBN 3-8167-4103-7. 63 s. [online], [14. 7. 2018]. dostupné z: https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/Dissertationen/hk_dissertation_etcm45-30731.pdf
- [12] WUFI®Pro.5.3 Manual, Department of Hygrothermics at the Fraunhofer IBP (2010) . [online], [8. 9. 2019]. dostupné z: https://wufi.de/download/WUFI_Pro_4_Manual.pdf
- [13] Binder A, Zirkelbach D, Kunzel H. 2010. Test Method to Quantify the Wicking Properties of Insulation Materials Designed to Prevent Interstitial Condensation. USA : ASHRAE. [online], [14. 7. 2018]. dostupné z: https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/2010%20B11%20papers/26_Binder.pdf

- [14] Vereecken E, et. al. 2015. Interior insulation for wall retrofitting – A probabilistic analysis of energy savings and hygrothermal risks. Energy and buildings 89. ISSN 0378-7788. 231-244 s.
- [15] Scheffler G, Grunewald J. 2003. Material development and optimization support by numerical simulation for capillary-active inside insulation material. Research in Building Physics. Lisse: A.A. Balkema Publishers: 463-469s.
- [16] National standard, STN 730540-3 : 2012, Thermal protection of buildings. Thermal performance of buildings and components. Part 3: Properties of environmental and building products.

Lukáš Vargic¹, Monika Rychtáriková², Jana Gregorová³

Študijný program: D-TKPS4 - Teórie a konštrukcie pozemných stavieb, 3.ročník

AKUSTICKÉ VLASTNOSTI TEPELNE IZOLOVANÝCH OBVODOVÝCH MURÍV HISTORICKÝCH BUDOV

ACOUSTIC PROPERTIES OF THERMAL INSULATED EXTERIOR ENVELOPE OF HISTORICAL BUILDINGS

Abstract

Retrofitting of historical monuments in terms of their improvement in energy performance and overall sustainability is one of the frequently discussed topics in the building industry and architecture. However, the renovation of monuments is highly interdisciplinary task and therefore, the global assessment of proposed solutions is needed.

In this paper we talk about the impact of additional thermal insulation on historical facade, while keeping the reversibility of the action, examining the sound insulation performance. There are presented typical cases of energy retrofit in area of Slovakia and sound reduction index R (dB) is predicted in Norflag software 4.0 using transfer matrix method as a calculation algorithm. The results are discussed in terms of its thermo-acoustic performance.

Keywords: thermal insulation, sound insulation, historical building, interdisciplinarity

Obnova historických pamiatok patrí z hľadiska zlepšovania ich energetickej hospodárnosti a celkovej udržateľnosti momentálne k najfrekvencovanejším témam v oblasti stavebníctva a architektúry. Pamiatková obnova je však veľmi interdisciplinárnou problematikou a preto je mimoriadne potrebné, aby sa zhodnocovali navrhované riešenia zo širšieho hľadiska.

Tento príspevok opisuje vplyv dodatočného tepelného izolovania historických budov na akustické parametre obvodového plášťa. Prezentované sú prípady štandardného tepelného izolovania v slovenských podmienkach a index vzduchovej nepriezvučnosti R (dB) je kalkulovaný v softvéri Norflag 4.0, využívajúc metódu prenosovej matice ako výpočtového algoritmu. Výsledky štúdie sú analyzované z hľadiska tepelno-akustického vplyvu.

Kľúčové slová: tepelná izolácia, zvuková izolácia, historická budova, interdisciplinarita

¹ Lukáš, Vargic, **Ing.**, Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

² Monika, Rychtáriková, **prof. Ing. PhD.**, KU Leuven, Fakulta architektúry, Hoogstraat 51, 9000 Gent, Belgicko

³ Jana, Gregorová, **doc. Ing.arch. PhD.**, STU BA, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

1. Úvod do problematiky

Počas posledných rokov sa venovalo množstvo výskumných projektov a bolo vedených veľa iniciatív, ktoré sa zaoberali energetickou hospodárnosťou ako aj problematikou komfortu vnútorného prostredia v historických budovách [1]. Väčšina doterajšieho vykonaného výskumu sa zameriavala na vplyv transferu vlhkosti v konštrukciách týchto budov, ktoré boli zateplené zo strany interiéru. Je to typické práve pre prípady, keď nie je možné použiť zateplenie z exteriéru kvôli umelecko-historickej ozdobnosti fasády, prípadne celkovej autenticity objektu. Princípy zachovania autenticity historického dedičstva taktiež odmietajú také zásahy, ktoré by invazívnym spôsobom narúšali fyzickú podstatu originálu. Z tohto dôvodu by mala byť metodika zvyšovania energetickej hospodárnosti i udržateľnosti architektonického dedičstva založená na riešeníach reverzibilných technológií [4].

Vplyv rôznych renovačných riešení bol už výrazne preskúmaný najmä v zmysle tepelného komfortu, avšak iba malá pozornosť bola venovaná dôsledkom na ďalšie aspekty komfortu vnútorného prostredia, ako napríklad akustický komfort. Tento príspevok je súčasťou systematického skúmania tepelného i zvukového izolovania historických budov, kde by mali byť energetická efektívnosť a akustický komfort [5] postavené do balansu, zatiaľ čo autenticita diela nebude výrazne narušená.

Prezentovaná štúdia je založená na jednoduchom experimente, v ktorom sa sledujú tri druhy tepelne izolovaných historických murív (kamenný múr hr. 600 mm, tehlové murivá hr. 450 mm a 300 mm). Každá vzorka bola posudzovaná v troch variantoch zateplenia pri dosiahnutí rovnakej hodnoty súčiniteľa prechodu tepla U (m².K). Rozdiely v akustických ukazovateľoch kalkulovaných v softvéri Norflag sú ďalej zobrazené a analyzované.

2. Prípadová štúdia

Štúdia je rozčlenená do nasledovných častí: (i) výber typických konštrukcií historických murív, (ii) výber variantov tepelnej izolácie, (iii) zhodnotenie akustických benefitov vo vzťahu k izolačným variantom.

2.1 Definovanie typov historických murív

Štúdia bola aplikovaná na vybraných reprezentantoch murív historických objektov tradičného typu v rámci oblasti strednej Európy. Na základe prehľadu literatúry a ostatných dostupných materiálov boli určené dve hlavné skupiny obvodových konštrukcií, prezentujúce základné princípy architektonickej kultúry uplynulých storočí a tvoriace dominantnú zložku stavebnej substancie zachovaného architektonického dedičstva: murivá kamenného a tehlového typu. Náročnosť procesu voľby vhodných zástupcov spočívala v definovaní adekvátnych dimenzií a rozmerov konštrukcií, predovšetkým v prípade kamenného muriva, nakoľko v časoch výstavby objektov z kamenných konštrukcií ešte neexistovala typizácia v stavebníctve a aj z ďalších iných dôvodov nachádzame hrúbky jednotlivých stien aj v rámci jedného objektu rozdielne. Ako najvhodnejší model historického kamenného muriva bolo pre potreby výpočtov stanovené pieskovecovo murivo hrúbky 600 mm, najčastejšie sa vyskytujúce v skúmanej oblasti. Aj keď zvolená hrúbka a materiál nepredstavujú najčastejšie sa vyskytujúcu vzorku konštrukcie, z hľadiska aplikácie tepelného izolantu ide o najvhodnejšieho kandidáta za účelom skúmania. Tehlový fragment je zastúpený variantne v dvoch hrúbkach – 450 mm hrubé murivo z kusových stavív predstavujúce najpočetnejšiu skupinu murovaných obvodových konštrukcií v strednej Európe a 300 mm hrúbka, ako akademický príklad tehlovej steny pre porovnanie s prípadmi, kedy je index vzduchovej nepriezvučnosti počítateľne nižší.



Obr. 1: Vľavo typický gotický meštiansky dom z pieskovcových murív obvodového plášťa. Vpravo objekt z prelomu 19. a 20. storočia postavený zo 450 mm hrubých tehlových múrov.

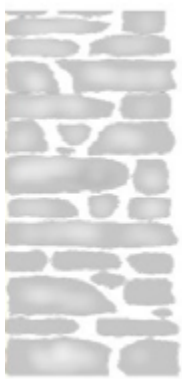
2.2 Výber variantov tepelnej izolácie

Obvodový plášť budovy je najexponovanejšou časťou budovy a preto musí spĺňať určité požiadavky na teplotné a akustické parametre. V prípade historického dedičstva, architektonických pamiatok alebo v prípade budov s veľkou kultúrnou či architektonickou hodnotou sú tieto hodnoty dôkladne chránené a udržiavané. Tento fakt najmä vyúsťuje do diskusií, keď sa jedná o obnovu budovy takého charakteru. Prezentovaná štúdia sa zameriava na dopad dodatočnej tepelnej izolácie na obálku budovy, ktorá môže byť aplikovaná viacerými spôsobmi: pre potreby tejto štúdie ide o vonkajšie zateplenie a dva druhy vnútorného zateplenia systému.

Najefektívnejší spôsob renovácie existujúceho stavebného fondu založený na energetickej hospodárnosti a zlepšení kvality vnútorného prostredia budov je tepelné izolovanie obvodových konštrukcií z exteriérovej strany. Táto stratégia však nie je vždy aplikovateľná na objektoch s historickou a architektonickou hodnotou, rovnako ako na budovách chránených pamiatkovým zákonom, ktorého požiadavky sa vzťahujú na zachovanie originálneho vzhľadu fasády budovy. Alternatívnym a dnes čoraz viac populárnejším spôsobom zvyšovania tepelnej ochrany obálky je metóda interiérového zateplenia, ktorá býva často jedným východiskom.

Pre potreby štúdie boli vybraté nasledovné prípadové varianty (Obr.2,3): tri typy vyššie spomínaných murovaných konštrukcií (600 mm pieskovcové murivo, 450 mm a 300 mm murivo z plnej pálenej tehly), ktoré boli kombinované s tromi rôznymi systémami tepelného izolovania fasád. Aspekt tepelnej ochrany bol v každom variante dodržaný v zmysle súčasných teplotných požiadaviek pre obnovované budovy. Z materiálového hľadiska boli použité izolanty na báze minerálnej vlny v rôznych hrúbkach v závislosti od (i) typu muriva, (ii) pozície izolantu voči murivu, (iii) technológie aplikovania izolačného materiálu na podklad. V prípade zateplenia vonkajšej strany fasády bola použitá technológia ETICS (kontaktný zateplovací systém) s izolantom na báze extrudovaného polystyrénu s tenkou vrstvou omietky.

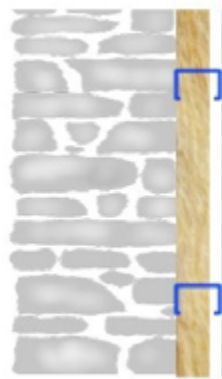
Výber rôznych variantov tepelného izolovania historických murív má za cieľ porovnať akustické ukazovatele rôznych rozličných systémov.



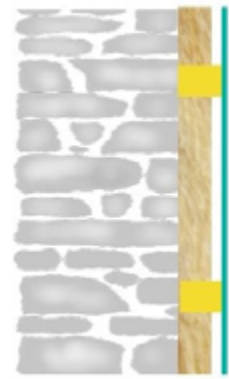
Kamenné murivo
600 mm



ETICS 140 mm
+ 3 mm omietka

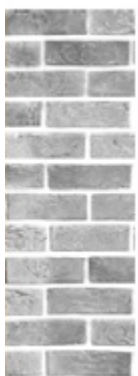


vnút. 120 mm vlna
kovová konštr.



vnút. 120mm vlna
drevená konštr.

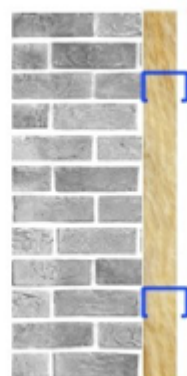
Obr. 2: Posudzované varianty izolovaných fragmentov kamenného muriva.



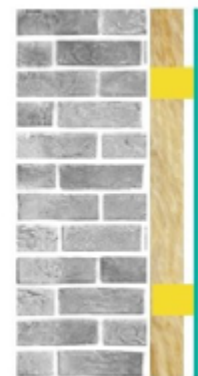
tehlové murivo
450 (300) mm



ETICS 160 mm
+ 3 mm omietka



vnút. 140 mm vlna
kovová konštr.



vnút. 140mm vlna
drevená konštr.

Obr. 3: Posudzované varianty izolovaných fragmentov tehlového muriva.

3. Metódy

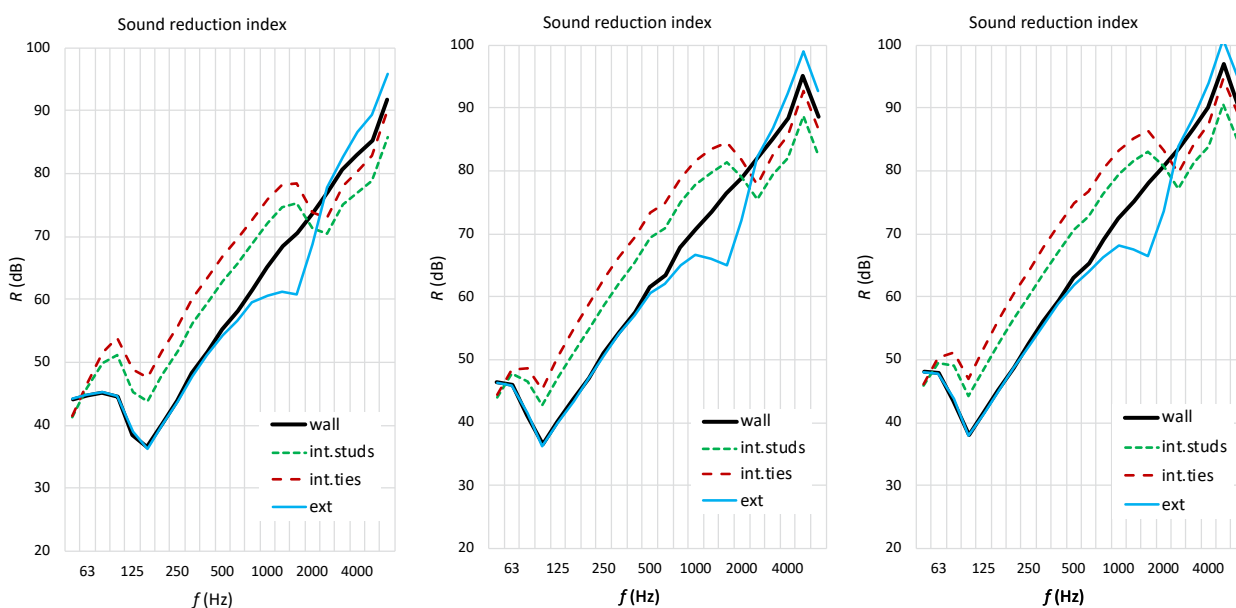
Výpočty boli realizované v akustickom softvéri Norflag 4.0, vytvorenom pre kalkulácie teoretických hodnôt indexu vzduchovej nepriezvučnosti R (dB) konštrukcií, ktoré je možné namodelovať vo viacerých vrstvách a rozličných materiáloch [11]. Simulačný algoritmus umožňuje výpočty stredných hodnôt v tretino-oktávových pásmach využívajúc metódu transferovej matice. Výpočty môžu byť vyhotovené pre zvolený uhol dopadu alebo pre difúzne zvukové pole.

Pri výpočte je každá vrstva je považovaná za nekonečnú platňu a je reprezentovaná maticou, ktorá je kombinovaná s ostatnými vrstvami matice. Dva typy platní môžu byť vybrané na predikciu zvukovej izolácie steny: tenké platne a hrubé platne. Tenké platne sú volené vtedy, keď vlnová dĺžka ohybovej vlny je väčšia ako 6-násobok hrúbky tejto platne. V tomto prípade sa používa výpočtová matica 2x2, keďže nie je prítomný pohyb vlny vo vnútri platni. Pórové materiály sú simulované rovnakým spôsobom, maticami 2x2. V prípadoch, kedy sú dve vrstvy zlepené dokopy, prichádza do úvahy variant hrubej platne, nakoľko preberá vlastnosti oboch spojených platní. Výpočty uvažujúce s metódou hrubej platne sú použiteľné pre konštrukcie stien alebo sendvičových elementov, ktoré sú zlepené dokopy, a popisované sú maticou 4x4.

Pre účely porovania v článku bol kalkulovaný index vzduchovej nepriezvučnosti R (dB) a vážený index vzduchovej nepriezvučnosti R_w (C , C_{tr}) v decibeloch. Simulácie prenosu zvuku boli vykonané v tretino-oktávových pásmach v difúznom poli a prenosovým oknom 10 m².

4. Výsledky a analýzy

Výsledky simulovaného prenosu zvuku sú zosumarizované v grafickej podobe, pomocou nasledujúceho grafu (Obr. 4) a tabuľky (Tab. 1). Výsledky ukazujú index vzduchovej nepriezvučnosti pre všetky varianty, zjednotené do troch grafov. Vo všetkých prípadoch je evidentné zlepšenie indexu, ak je aplikovaná izolácia z interiérovej strany obvodového plášťa. Aj pri minimálnom kontakte sadrokartónovej dosky narastá R_w o 10 - 11 dB, vo variante s drevenou podkonštrukciou je nárast len 8 dB. V oboch prípadoch prížinového systému (vnútorné zateplenie) je viditeľný náhodný pokles vrámci murovanej konštrukcie pri nízkych frekvenciách (a pokles pri 2500 Hz, spôsobený sadrokartónovou doskou hr. 12,5 mm).



Obr. 4: Grafy simulovaných variantov. Vľavo - 300 mm tehlový fragment v troch variantoch, Stredný graf zobrazuje tehlový fragment hr. 450 mm, vpravo fragment kamenného muriva 600 mm. (čierna hrubá krivka ukazuje priebeh indexu vzduchovej nepriezvučnosti R (dB) pôvodnej steny bez tepelenej izolácie (TI). Zelená prerušovaná čiara vyjadruje vnútorné zateplenie s kovovou podkonštrukciou, červená prerušovaná čiara vnútornú TI s drevenou konštrukciou. Modrá čiara predstavuje priebeh indexu pre variant zateplenie kontaktným spôsobom z vonkajšej strany.

Všetky tri varianty kontaktného zateplňovacieho systému ETICS s polystyrénovým izolantom aplikovaným na vonkajšiu stranu fasády prezentujú veľmi podobné výsledky. Spojenie EPS s podkladom bolo simulované akoby s minimálnou medzerou, imitujúc tak nerovnosti pôvodného povrchu historickej fasády. Viditeľný pokles pri hodnote 2000 Hz je prítomný pri všetkých troch variantoch.

Tab. 1: Výpočtové výsledky indexov vzduchovej nepriezvučnosti R_w (C , C_{tr}) dB.

| Index vzduchovej nepriezvučnosti R_w (C , C_{tr}) dB | Bez izolácie | ETICS (EPS) | Vnút. Izolácia kovová konštr. | Vnút. Izolácia drevená konštr. |
|--|--------------|-------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Kamenné murivo 600 mm | 63 (-2, -8) | 62 (-2, -8) | 74 (-3, -9) | 70 (-2, -9) |
| Tehlové murivo 450 mm | 61 (-2, -8) | 61 (-2, -8) | 72 (-2, -9) | 69 (-3, -9) |
| Tehlové murivo 300 mm | 56 (-2, -6) | 56 (-2, -6) | 68 (-3, -7) | 64 (-2, -7) |
| Súčiniteľ prechodu tepla U | 1,20 | 0,21 | 0,22 | 0,22 |

5. Záver

Pri obnove architektonicky hodnotnej fasády je nevyhnutné klásť zvýšený dôraz na stupeň invazívnosti do originálu a výsledný zásah do autenticity objektu, či už v zmysle autenticity materiálu (fyzická podstata pamiatky) alebo autenticity diela ako celku (kultúrno historická podstata). Preto sa pri otázke zvyšovania tepelnej ochrany fasád hodnotných historických budov volí variant interiérového zateplovania. Umiestnenie tepelného izolantu z interiérovej strany však prináša v zimmnom období viacero nevýhod, pri uvažovaní nad čisto tepelno-vlhkostným režimom.

Z hľadiska stavebnej akustiky, simulácie a výpočty prezentujú benefity pri aplikovaní tepelnoizolačných systémov, najmä v prípadoch umiestnenia izolácie na vnútornú stranu fasády. Tento príspevok však ukazuje iba simulácie typických stenových fragmentov. V skutočnosti je zvuková izolácia budov oveľa viac komplikovanejšia záležitosť a mala by byť posudzovaná ako celok, zahrňujúc okná aj dvere.

PodĎakovanie

Táto práca bola podporená Európskou Komisiou, H2020-MSCA-RISE-2015 project 6990970, „PAPABUILD“ a Erasmus+ ako zahraničná stáž.

Použitá literatúra

- [1] Häkkinen T, Ruuska A, Vares S, Pulakka S, Kouhia I, Holopainen R. *Methods and concepts for sustainable renovation of buildings*, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland 2012.
- [2] UNEP 2007. *Buildings and Climate Change - Status, Challenges and Opportunities*. United Nations Environment Programme, Paris, France March 2007.
- [3] EN 16883:2017. Conservation of cultural heritage. *Guidelines for improving the energy performance of historic building*.
- [4] Gregorová J, Pagáčová P. *Ecological aspects of monument preservation - potential and limits?* TERRA SPECTRA STU. Planning Studies: Central European Journal of Spatial and Landscape Planning STU, Vol. 5, No. 2, p. 17-25, STU Bratislava, SPECTRA Centre of Excellence EU, Bratislava, Slovakia 2013.
- [5] Šujanová P, Rychtáriková M, Sotto Mayor T, Hyder A. *A healthy, energy-efficient and comfortable indoor environment, a review*. Energies. 2019, 12, 1414.
- [6] Foret R, Guigou-Carter C, Villot M. *Effect of thermal insulation systems on acoustic performances of ancient building construction elements*. Proc Internoise and Noise-on Institute of Noise Control Engineering, Portugal, 13-16 June 2010.
- [7] Guigou-Carter C, Foret R, Villot M, Chéné JB. *Effect of thermal renovation on acoustic performance of building*. Proc Euronoise 2009; Edinburgh, United Kingdom 2009.

**THEORY AND STRUCTURES OF
CIVIL ENGINEERING WORKS**

Mária Bolešová¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: 2

ÚČINNOSŤ NÁVRHU LOKÁLNE PODOPRETÝCH STROPNÝCH DOSIEK NA ZVÝŠENIE ŠMYKOVEJ ODOLNOSTI

EFFECTIVITY OF THE DESIGN OF THE FLAT SLABS TO INCREASE IN SHEAR RESISTANCE

Abstract

This paper is focused on the enhancing punching shear resistance of the flat slabs with the increase in thickness and the use of shear reinforcement. The design of a new structure as well as the reconstruction of the existing one should be as effective and economical as possible. Thickness of concrete slabs, type and amount of shear reinforcement have significant influence on the shear resistance of flat slabs. The most commonly used type of punching shear reinforcement in new buildings are double-headed studs. The parametric study presented in this paper is focused on the most effective strengthening technique and its verification according to various numerical models.

Kľúčové slová

Lokálne podopreté stropné dosky, šmyková odolnosť, šmyková výstuž.

1. Úvod

Pri návrhu budov, ale aj inžinierskych stavieb, je jednou z najdôležitejších podmienok návrhu efektívnosť a hospodárnosť vyhotovenia. Pri návrhu konštrukcie sa uvažujú viaceré varianty riešenia, ale len jeden sa skutočne realizuje.

Lokálne podopreté stropné dosky sú jedným z najpoužívanejších horizontálnych nosných systémov v budovách zhotovených zo železobetónu. V predbežnom návrhu je stropná doska často navrhnutá čo najtenšia. Dôsledkom takéhoto návrhu je, že v blízkosti stĺpa vznikajú veľké šmykové namáhania. Obvyklým riešením problému lokálneho namáhania v blízkosti podpory je zväčšenie hrúbky stropnej dosky alebo návrh šmykovej výstuže.

Predložená parametrická štúdia ukazuje efektívnosť použitia rôznej hrúbky stropnej dosky, množstva ohybovej a šmykovej výstuže, s úmyslom dosiahnuť čo najväčšiu štíhlosť a účinnosť.

V príspevku je pozorovaná šmyková odolnosť podľa štyroch výpočtových postupov. Výsledky sú porovnané s experimentálnym overením lokálne podopretej stropnej dosky [10].

2. Návrh a výpočet

Na návrh nosných konštrukcií budov je možné použiť viacero výpočtových postupov, pričom všetky prinášajú mierne odlišné výsledky. Príspevok prináša výsledky štyroch rôznych výpočtových modelov, a to podľa Eurokódu 2 [1], Uniform Design Method [2], Model Code 2010 [3] [4] a poslednej verzie novej generácie Eurokódu 2 [5] [9].

¹ Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra betónových konštrukcií a mostov, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, tel: (02)59274-381, e-mail: maria.bolesova@stuba.sk

2.1 Návrh podľa Eurokódu 2 (EN 1992-1-1)

Eurokód 2 [1] je v Európe najpoužívanejší výpočtový postup na výpočet šmykovej odolnosti lokálne podopretých stropných dosiek so šmykovou výstužou (3). Šmyková odolnosť stropnej dosky pozostáva zo šmykovej odolnosti stropnej dosky bez šmykovej výstuže (1) a príspevku šmykovej odolnosti stropnej dosky od účinku šmykovej výstuže (2):

$$V_{Rm,c} = C_{Rm,c} \cdot k_h \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d \quad (1)$$

$$V_{Rm,s} = \frac{1,5 \cdot d}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{yw,ef} \quad (2)$$

$$V_{Rm,cs} = V_{Rm,c} + V_{Rm,s} \quad (3)$$

$$f_{yw,ef} = 250 \text{ MPa} + 0,25 \cdot d \leq f_{yw} \quad (4)$$

kde $C_{Rm,c} = 0,22 \text{ MPa}$ je konštanta, k_h je súčiniteľ vplyvu výšky prierezu, ρ_l je stupeň vystuženia ohybovou výstužou, f_{cm} je stredná hodnota pevnosti betónu v tlaku, A_{sw} je plocha šmykovej výstuže umiestnená na jednom kontrolnom obvode okolo stĺpa, $f_{yw,ef}$ je efektívna medza klzu šmykovej výstuže (4), f_{yw} je stredná hodnota medze klzu výstuže a s_r je radiálna vzdialenosť šmykovej výstuže.

Šmyková odolnosť bez šmykovej výstuže je uvažovaná s kontrolným obodom u_1 vo vzdialenosti $2d$ od líca stĺpa, kde d je účinná výška stropnej dosky (pozri Obr. 1).

Hodnota maximálnej šmykovej odolnosti v líci stĺpa (5) sa podľa Eurokódu 2 [1] vypočíta ako:

$$V_{Rm,max} = 0,5 \cdot v \cdot f_{cm} \quad (5)$$

kde v je faktor redukcie pevnosti betónu.

2.2 Návrh podľa Uniform Design Method (UDM)

Na základe výpočtového postupu v Eurokóde 2 bol vytvorený nový výpočtový model pre lokálne podopreté stropné dosky, známy ako „Uniform Design Method“ [2]. Šmyková odolnosť lokálne podopretých stropných dosiek so šmykovou výstužou (8) pozostáva tiež z dvoch častí, a to zo šmykovej odolnosti stropnej dosky bez šmykovej výstuže (6), ktorá je ovplyvnená geometriou dosky a množstvom ohybovej výstuže, a tiež šmykovou odolnosťou stropnej dosky od príspevku šmykovej výstuže (7):

$$V_{Rm,c} = C_{Rm,c} \cdot k_d \cdot k_\lambda \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{\frac{1}{3}} \cdot u_{0.5d} \cdot d \quad (6)$$

$$V_{Rm,s} = A_{sw,1,25d} \cdot f_{yw} \cdot \sin(\alpha) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_{Rm,c} &\geq V_{Rm,s}; V_{Rm,c+s} = V_{Rm,c} + V_{Rm,s} \cdot \alpha_s \\ V_{Rm,c} &< V_{Rm,s}; V_{Rm,c+s} = V_{Rm,c} \cdot \alpha_c + V_{Rm,s} \end{aligned} \quad (8)$$

kde $C_{Rm,c} = 2,2 \text{ MPa}$ [6] je stredná hodnota pre výpočet šmykovej sily, k_d je faktor zohľadňujúci vplyv výšky prierezu, k_λ je súčiniteľ zohľadňujúci vplyv veľkosti stĺpa a pomeru šmykovej výšky, $A_{sw,1,25d}$ je plocha šmykovej výstuže vo vzdialenosti $0,30d$ až $1,25d$ od líca stĺpa, α je uhol medzi stropnou doskou a šmykovou výstužou, $\alpha_c = \alpha_s = 0,3$, α_s je súčiniteľ zohľadňujúci príspevok šmykovej výstuže, α_c je súčiniteľ zohľadňujúci príspevok betónu, a $f_{yw} = 350 \text{ MPa}$ je stredná hodnota medze klzu výstuže.

Šmyková odolnosť stropnej dosky bez šmykovej výstuže sa uvažuje na kontrolnom obvode $u_{0,5d}$ vo vzdialenosti $0,5d$ od líca stĺpa, kde d je účinná výška stropnej dosky (Obr. 1).

Maximálna šmyková odolnosť lokálne podopretej stropnej dosky (9) sa vypočíta podľa UDM [2]:

$$V_{Rm,max} = \alpha_{max} \cdot V_{Rm,c} \quad (9)$$

kde α_{max} je faktor zvýšenia šmykovej odolnosti (v prípade tŕňov s rozkovanou hlavou je uvažovaná hodnota 1,8).

2.3 Návrh podľa výpočtového postupu Model Code 2010

Model Code 2010 [3] [4] [7] je založený na fyzikálnom modeli s názvom „Critical shear crack theory“, ktorý prináša novú presnejšiu metódu navrhovania.

Šmyková odolnosť lokálne podopretej stropnej dosky so šmykovou výstužou (12) sa vypočíta ako súčet šmykovej odolnosti stropnej dosky bez šmykovej výstuže (10) a príspevku šmykovej odolnosti vplyvom šmykovej výstuže (11):

$$V_{Rm,c} = k_{\psi} \cdot \frac{\sqrt{f_{cm}}}{\gamma_c} \cdot b_0 \cdot d_v \quad (10)$$

$$V_{Rm,s} = A_{sw} \cdot k_e \cdot \sigma_{swm} = A_{sw} \cdot k_e \cdot \frac{E_s \cdot \psi}{6} \cdot \left(1 + \frac{f_{bm}}{f_{ywm}} \cdot \frac{d}{\varphi_w}\right) \quad (11)$$

$$V_{Rm} = V_{Rm,c} + V_{Rm,s} \quad (12)$$

kde k_{ψ} je súčiniteľ zohľadňujúci vplyv roztvárania trhliny a drsnosti na šmykovú odolnosť, d_v je účinná výška prvku v šmyku, $\gamma_c = 1$ parciálny súčiniteľ spoľahlivosti pre betón, A_{sw} je plocha šmykovej výstuže vo vzdialenosti $0,30d_v$ až $1,25d_v$ od líca stĺpa, k_e je koeficient excentricity, E_s je modul pružnosti výstuže, ψ je pootočenie dosky, f_{bm} je stredná hodnota pevnosti betónu v súdržnosti, φ_w je priemer šmykovej výstuže, $f_{ywm} = 350 \text{ MPa}$ je stredná hodnota medze klzu výstuže.

Kontrolný obvod b_0 je v tomto výpočtovom postupe uvažovaný vo vzdialenosti $0,5d$ od líca stĺpa (Obr. 1).

2.4 Návrh podľa poslednej verzie novej generácie Eurokódu 2 (prEN 1992-1-1:2018)

Pripravovaná nová generácia Eurokódu 2 [5], [9] je založená na Model Code 2010 a mala by priniesť presnejšie výsledky. V novom, ako aj v platnom Eurokóde 2, šmyková odolnosť lokálne podopretej stropnej dosky so šmykovou výstužou (15) pozostáva zo šmykovej odolnosti stropnej dosky bez šmykovej výstuže (13) a šmykovej odolnosti, ktorá je príspevkom účinku šmykovej výstuže (14):

$$V_{Rm,c} = \tau_{Rm,c} \cdot b_0 \cdot d_v = \frac{0,6}{\gamma_c} \cdot k_{pb} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm} \cdot \frac{d_{ag}}{d_v}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot b_0 \cdot d_v \quad (13)$$

$$V_{Rm,s} = \eta_s \cdot \tau_{Rm,c} \cdot b_0 \cdot d_v = \eta_s \cdot \rho_{sw} \cdot f_{ywm} \cdot b_0 \cdot d_v \quad (14)$$

$$V_{Rm,c+s} = \eta_c \cdot V_{Rm,c} + V_{Rm,s} \quad (15)$$

$$\eta_c = \frac{V_{Rm,c}}{V_{Em}} \quad (16)$$

$$\eta_s = \left(15 \cdot \frac{d_{ag}}{d}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{1}{\eta_c \cdot k_{pb}}\right)^{\frac{3}{2}} = \left(15 \cdot \frac{d_{ag}}{d}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{0,8}{\eta_c \cdot k_{pb}}\right)^{\frac{3}{2}} + 0,1 \leq 0,8 \quad (17)$$

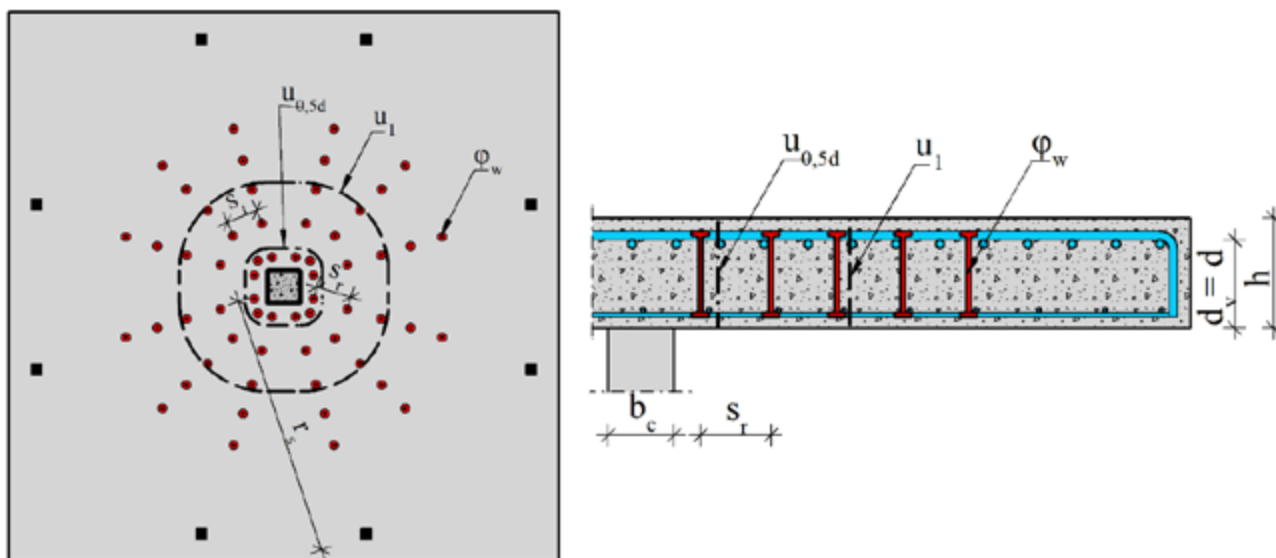
kde k_{pb} je koeficient zvyšujúci stupeň šmykovej sily, d_{dg} je parameter veľkosti popisujúci drsnosť trhlín a zónu lomu so zohľadnením typu betónu a vlastností kameniva, ρ_{sw} je stupeň vystuženia šmykovou výstužou, η_c je koeficient znižujúci príspevok šmykovej odolnosti stropnej dosky bez šmykovej výstuže (16), η_s je koeficient znižujúci príspevok šmykovej odolnosti stropnej dosky so šmykovou výstužou (17), $f_{yw} = 500MPa$ je stredná hodnota medze klzu výstuže, d je účinná výška stropnej dosky a d_v je účinná výška odolnosti dosky v šmyku.

Kontrolný obvod b_0 je predpokladaný vo vzdialenosti $0,5d_v$ od líca podpery (Obr. 1).

Maximálna šmyková odolnosť lokálne podopretej stropnej dosky v líci podpery (18) sa vypočíta nasledovne:

$$V_{Rm,max} = \eta_{sys} \cdot V_{Rm,c} \quad (18)$$

kde η_{sys} je koeficient zohľadňujúci maximálnu hodnotu šmykovej odolnosti (v prípade trňov s rozkovanou hlavou je uvažované s hodnotou 1,8).



Obr. 1: Lokálne podopretá stropná doska so šmykovou výstužou a znázornenými kontrolnými obvodmi podľa rôznych výpočtových postupov: pôdorys (vľavo) a rez (vpravo)

3. Numerická štúdia

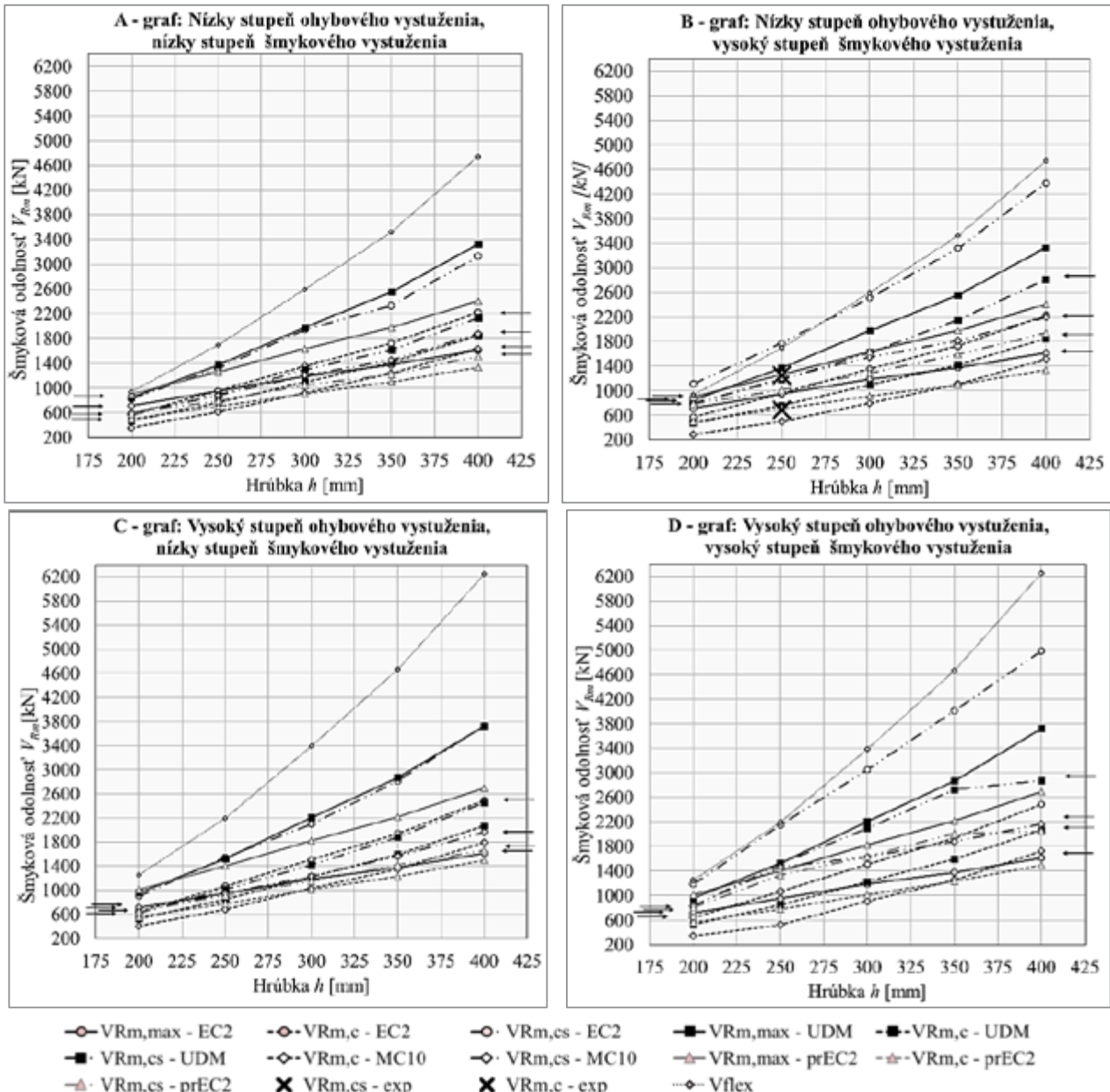
V numerickej štúdii je zahrnutých päť stropných dosiek s rôznymi hrúbkami, ale s rovnakým nosným systémom. Každá doska má dve rôzne úrovne stupňa vystuženia ohybovou výstužou (približne 1,4% a 1,9%) a zároveň aj dve úrovne stupňa vystuženia šmykovou výstužou (vysoký a nízky stupeň vystuženia).

Všetky typy uvažovaných lokálne podopretých stropných dosiek sú vypočítané podľa Eurokódu 2, UDM, Model Code 2010 a poslednej verzie novej generácie Eurokódu 2. Šmykové odolnosti stropných dosiek bez šmykovej výstuže a s ňou sú porovnané v Tab. 1 a znázornené na Obr. 2.

Na porovnanie výsledkov výpočtov boli vybrané dve experimentálne skúšané doskové vzorky [10]. Skúšobná vzorka mala hrúbku 250 mm a stupeň vystuženia ohybovou výstužou 1,57%. Šmyková výstuž bola rovnomerne rozmiestnená okolo kruhového stĺpa, a to 16 kusov trňov s rozkovanou hlavou s priemerom 10 mm. Prvá vzorka bez šmykovej výstuže zlyhala pri sile 690 kN, druhá skúšobná vzorka so šmykovou výstužou zlyhala pri sile 1250 kN.

Tab. 1 Výsledky šmykovej odolnosti podľa normových výpočtových postupov

| Graf | h [mm] | φ_s/\bar{a} [mm/mm] | ρ_l [%] | $\varphi_{sw}/numb.$ [mm/-] | ρ_{sw} [-] | Eurokód 2 | | | Model Code 2010 | | | Uniform Design Method | | | Nová gen. Eurokódu 2 | | |
|------|--------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------------|------------------|-------------------|----------------------|------------------|-------------------|
| | | | | | | $V_{Rm,c}$ [kN] | $V_{Rm,cs}$ [kN] | $V_{Rm,max}$ [kN] | $V_{Rm,c}$ [kN] | $V_{Rm,cs}$ [kN] | $V_{Rm,max}$ [kN] | $V_{Rm,c}$ [kN] | $V_{Rm,cs}$ [kN] | $V_{Rm,max}$ [kN] | $V_{Rm,c}$ [kN] | $V_{Rm,cs}$ [kN] | $V_{Rm,max}$ [kN] |
| A | 200 | 20/150 | 1,40 | 6/16 | nízky | 570 | 830 | 713 | 356 | 590 | 472 | 567 | 849 | 501 | 583 | 901 | |
| | 250 | 20/110 | 1,43 | 8/12 | | 959 | 1321 | 950 | 615 | 883 | 762 | 889 | 1372 | 700 | 794 | 1261 | |
| | 300 | 20/90 | 1,40 | 10/12 | | 1354 | 1943 | 1188 | 924 | 1206 | 1099 | 1297 | 1979 | 910 | 1047 | 1637 | |
| | 350 | 25/120 | 1,41 | 10/12 | | 1728 | 2336 | 1378 | 1241 | 1451 | 1419 | 1617 | 2555 | 1099 | 1222 | 1978 | |
| | 400 | 25/105 | 1,38 | 12/12 | | 2226 | 3135 | 1616 | 1635 | 1877 | 1849 | 2134 | 3328 | 1337 | 1509 | 2407 | |
| B | 200 | 20/150 | 1,40 | 10/12 | vysoký | 570 | 1112 | 713 | 288 | 777 | 472 | 801 | 849 | 501 | 780 | 901 | |
| | 250 | 20/110 | 1,43 | 12/12 | | 959 | 1773 | 950 | 499 | 1203 | 762 | 1179 | 1372 | 700 | 1017 | 1261 | |
| | 300 | 20/90 | 1,40 | 14/12 | | 1354 | 2509 | 1188 | 798 | 1545 | 1099 | 1623 | 1979 | 910 | 1286 | 1637 | |
| | 350 | 25/120 | 1,41 | 14/16 | | 1728 | 3316 | 1378 | 1104 | 1815 | 1419 | 2150 | 2555 | 1099 | 1589 | 1978 | |
| | 400 | 25/105 | 1,38 | 16/16 | | 2226 | 4381 | 1616 | 1515 | 2195 | 1849 | 2807 | 3328 | 1337 | 1943 | 2407 | |
| C | 200 | 20/105 | 2,00 | 6/16 | nízky | 642 | 902 | 713 | 406 | 641 | 531 | 626 | 956 | 564 | 643 | 1015 | |
| | 250 | 20/80 | 1,97 | 8/12 | | 1066 | 1549 | 950 | 680 | 950 | 848 | 1017 | 1526 | 779 | 910 | 1402 | |
| | 300 | 20/65 | 1,94 | 10/12 | | 1510 | 2099 | 1188 | 1036 | 1231 | 1225 | 1423 | 2206 | 1014 | 1148 | 1825 | |
| | 350 | 25/85 | 1,99 | 10/12 | | 1938 | 2814 | 1378 | 1352 | 1566 | 1592 | 1877 | 2866 | 1233 | 1421 | 2219 | |
| | 400 | 25/75 | 1,93 | 12/12 | | 2490 | 3728 | 1616 | 1792 | 1963 | 2069 | 2456 | 3723 | 1496 | 1664 | 2693 | |
| D | 200 | 20/105 | 2,00 | 10/12 | vysoký | 642 | 1184 | 713 | 343 | 832 | 531 | 819 | 956 | 564 | 805 | 1015 | |
| | 250 | 20/80 | 1,97 | 12/12 | | 1066 | 2152 | 950 | 524 | 1462 | 848 | 1521 | 1526 | 779 | 1333 | 1402 | |
| | 300 | 20/65 | 1,94 | 14/12 | | 1510 | 3049 | 1188 | 907 | 1630 | 1225 | 2092 | 2206 | 1014 | 1637 | 1825 | |
| | 350 | 25/85 | 1,99 | 14/16 | | 1938 | 4013 | 1378 | 1254 | 1880 | 1592 | 2730 | 2866 | 1233 | 2011 | 2219 | |
| | 400 | 25/75 | 1,93 | 16/16 | | 2490 | 4988 | 1616 | 1728 | 2168 | 2069 | 2872 | 3723 | 1496 | 2046 | 2693 | |

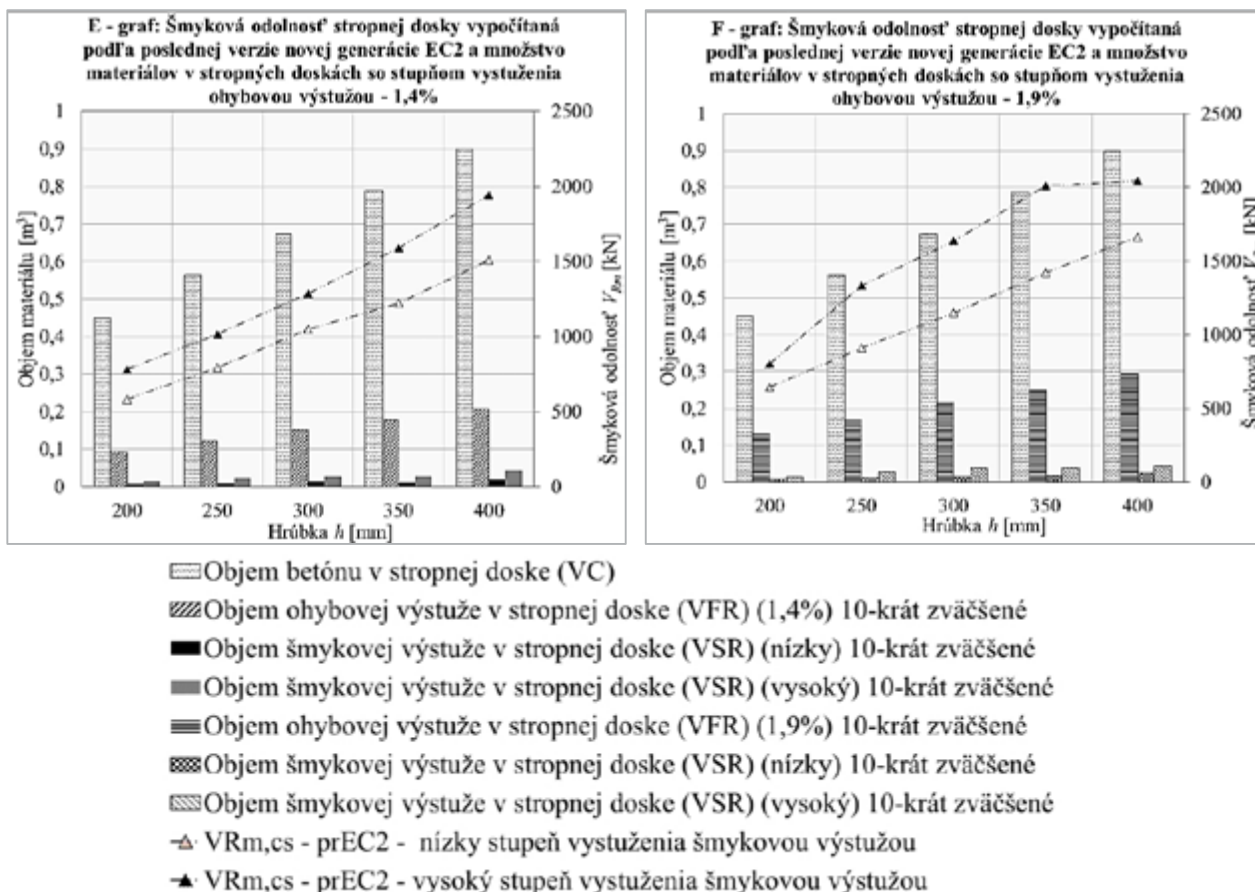


Obr. 2: Šmyková odolnosť lokálne podopretých stropných dosiek vypočítaná podľa v kapitole 2. uvedených výpočtových postupov. Graf A zobrazuje šmykovú odolnosť stropných dosiek so stupňom vystuženia ohybovou výstužou 1,4% a nižším stupňom vystuženia šmykovou výstužou (vľavo hore); graf B ukazuje šmykovú odolnosť stropných dosiek so stupňom vystuženia ohybovou výstužou 1,9% a vyšším stupňom vystuženia šmykovou výstužou (vpravo hore); graf C zobrazuje šmykovú odolnosť stropných dosiek so stupňom vystuženia ohybovou výstužou 1,4% a nižším stupňom vystuženia šmykovou výstužou (vľavo dole); graf D ukazuje šmykovú odolnosť stropných dosiek so stupňom vystuženia ohybovou výstužou 1,9% a vyšším stupňom vystuženia šmykovou výstužou (vpravo dole).

4. Vyhodnotenie účinnosti návrhu stropnej dosky na preťaženie

Dosiahnutie vyššej účinnosti nosných konštrukcií pri výstavbe nie je jednoduché, pretože každý architektonický návrh je jedinečný. Jeho originalita nespočíva len v architektonickom zobrazení, ale aj v jednoduchosti návrhu a hospodárnosti zhotovenia.

V štúdií sú porovnané šmykové odolnosti lokálne podopretých stropných dosiek s rôznymi hrúbkami, stupňami vystuženia ohybovou a šmykovou výstužou. Výsledky sú rozdelené do štyroch skupín s rôznym objemom betónu a výstuže, vid' Obr. 3, Tab. 2. Objem betónu V_C je vymedzený hrúbkou stropnej dosky, objem ohybovej výstuže V_{FR} závisí od dvoch stupňov vystuženia (1,4% a 1,9%) a objem šmykovej výstuže V_{SR} je závislý od vyššej a nižšej hodnoty stupňa vystuženia šmykovou výstužou.



Obr. 3: Spotreba materiálu v lokálne podopretej stropnej doske v nadpodperovej oblasti s rozmermi 1,5m x 1,5m vykázaná v objemoch betónu a výstuže

Tab. 2 Výsledky využitia materiálov podľa rôznych výpočtových postupov

| Graf | h [mm] | V_C [m³] | φ_s/\bar{a} [mm/mm] | V_{FR} [m³] | V_{FR} [%] | φ_{sw}/k_s [mm/-] | V_{SR} [m³] | V_{SR} [%] | φ_{sw}/k_s [mm/-] | V_{SR} [m³] | V_{SR} [%] |
|------|----------|------------|-----------------------------|---------------|--------------|---------------------------|---------------|--------------|---------------------------|---------------|--------------|
| E | 200 | 0,450 | 20/150 | 0,0094 | 2,09 | 6/16 | 0,0007 | 0,15 | 10/12 | 0,0014 | 0,31 |
| | 250 | 0,563 | 20/110 | 0,0123 | 2,18 | 8/12 | 0,0010 | 0,17 | 12/12 | 0,0022 | 0,39 |
| | 300 | 0,675 | 20/90 | 0,0151 | 2,23 | 10/12 | 0,0014 | 0,21 | 14/12 | 0,0028 | 0,41 |
| | 350 | 0,788 | 25/120 | 0,0177 | 2,24 | 10/12 | 0,0011 | 0,14 | 14/16 | 0,0029 | 0,36 |
| | 400 | 0,900 | 25/105 | 0,0206 | 2,29 | 12/12 | 0,0018 | 0,21 | 16/16 | 0,0044 | 0,49 |
| F | 200 | 0,450 | 20/105 | 0,0132 | 2,93 | 6/16 | 0,0007 | 0,15 | 10/12 | 0,0014 | 0,31 |
| | 250 | 0,563 | 20/80 | 0,0170 | 3,02 | 8/16 | 0,0013 | 0,23 | 12/16 | 0,0029 | 0,51 |
| | 300 | 0,675 | 20/65 | 0,0217 | 3,21 | 10/12 | 0,0014 | 0,21 | 14/16 | 0,0037 | 0,55 |
| | 350 | 0,788 | 25/85 | 0,0250 | 3,18 | 12/12 | 0,0016 | 0,22 | 16/16 | 0,0037 | 0,47 |
| | 400 | 0,900 | 25/75 | 0,0295 | 3,27 | 14/12 | 0,0025 | 0,21 | 16/16 | 0,0044 | 0,49 |

5. Záver

V lokálne podopretých stropných doskách s hrúbkou 200 mm a 250 mm sú výsledky podľa všetkých štyroch výpočtových postupov podobné. Pri doskách s vyššou hrúbkou sa však v rámci jednotlivých výpočtových postupov začínajú prejavovať výraznejšie rozdiely. Pri porovnaní výsledkov z výpočtových postupov s realizovaným experimentálnym meraním (Majtánová, 2017) sa javí ako najpresnejšia posledná verzia novej generácie Eurokódu 2.

V každom numerickom postupe je rozhodujúcim výsledkom zlyhania iná šmyková odolnosť (ako je vidieť na Obr. 2 - označené pomocou šípok). V niektorých prípadoch je rozhodujúcou odolnosťou maximálna šmyková odolnosť stropnej dosky ako to je pri výpočtovom postupe podľa EC2. V iných modeloch, ako je Model Code 2010 a nová generácia Eurokódu 2, je rozhodujúcou hodnotou šmyková odolnosť lokálne podopretej stropnej dosky so šmykovou výstužou. V prípade tenších dosiek je ich ohybová kapacita nízka, a preto zvýšenie šmykovej odolnosti stropnej dosky šmykovou výstužou je neúčinné a stropná doska zlyhá v ohybe.

Stropné dosky s hrúbkou od 250 mm do 350 mm sa javia ako najvhodnejšie. Majú dostatočnú rezervu v ohybe, dokonca aj v prípadoch s nižším stupňom vystuženia pozdĺžnou výstužou.

Zvýšenie stupňa vystuženia ohybovou výstužou na hodnotu 2% nespôsobuje významné zvýšenie šmykovej odolnosti, je neefektívne a nákladné. Na druhej strane, vyššiu šmykovú odolnosť je možné dosiahnuť zvýšením množstva šmykovej výstuže v stropnej doske, čo predstavuje efektívnejší návrh.

6. PodĎakovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja v rámci projektu APVV-15-0658 a Vedeckou grantovou agentúrou VEGA z projektu VEGA 1/0254/19.

Literatúra

- [1] EN1992-1-1 Design of Concrete Structures, Part 1-1 General Rules and Rules for Buildings, May 2004.
- [2] KUERES, D. - SIBURG, C. - HERBRAND, M. - CLASSEN, M. and HEGGER, J.: Uniform Design Method for punching shear in flat slabs and column bases. *Engineering Structures* (136), April 2017, pp. 149-164.
- [3] Fédération Internationale du Béton (fib), Model Code 2010 - Final draft, Vol. 1, fédération internationale du béton, *Bulletin 65*, Lausanne, Switzerland, 2012, Vol. 2.
- [4] Fédération Internationale du Béton (fib): Model Code 2010, final draft, vol. 2. fib, *Bulletin 66*, Lausanne, Switzerland, 2012, vol. 2, 370 pp.
- [5] Final Version of PT1-draft prEN 1992-1-1 2018 D3, work document N 1358 of CEN/TC 250/SC 2
- [6] SIBURG C.: Zur einheitlichen Bemessung gegen Durchstanzen in Flachdecken und Fundamenten. PhD-thesis., RWTH Aachen University, Institute of Structural Concrete 2014.
- [7] MUTTONI, A.; RUIZ, M. F.; BENTZ, E. C.; FOSTER, S. J.; and SIGRIST, V.: Background to the Model Code 2010 Shear Provisions - Part II Punching Shear. *Structural Concrete*, V. 14, No. 3, 2013, pp. 204-214. doi: 10.1002/suco.201200064.
- [8] BAŽANT Z.P.: Scaling of Structural Strength. Hermes Penton Sciene (Kogan Page Science). 2nd updated ed. London: *Elsevier*; 2005.
- [9] PT-SC2-T1 D3BG - Background documents to prEN 1992-1-1, work document N 1415 of CEN/TC 250/SC 2
- [10] MAJTANOVÁ L.: Maximálna odolnosť v pretlačení lokálne podopretých dosiek so šmykovou výstužou. PhD-thesis., Slovak University of Technology in Bratislava, Faculty of Civil Engineering STU in Bratislava 2017.

Ing. Marek Braniš¹

Študijný program: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 3. ročník

DOPRAVNÉ PRIESKUMY ZAMERANÉ NA VEREJNÚ HROMADNÚ DOPRAVU

TRAFFIC SURVEYS FOCUSED ON PUBLIC TRANSPORT

Abstract

For the purpose of designing the quality public transport system the data of passenger movements are an essential source of information. They determine transport demand, which can lead to designing the link capacity, route routing, line management, solution of transfer points, etc. Currently, information about the journeys is obtained by traffic surveys. Traffic surveys are carried out according to technical regulation TP102 - Calculation of road capacities. In spite of the division of methodology of traffic surveys listed in TP 102, in section 3.3.1, the technical regulation only deals with surveys, focused on determining the traffic or pedestrians routing and density. This technical regulation considers public transport vehicle only as a vehicle of certain dimensional and driveability characteristics without further consideration of its actual occupancy. The scope and flow of traffic surveys focused on public transport vehicles and passengers is therefore directed according to the exact needs of a particular company, organization or establisher of public transport, without any methodology written in any technical regulation.

Kľúčové slová

technický predpis TP 102, dopravný prieskum, verejná hromadná doprava, mestská hromadná doprava, profilový prieskum, vozový prieskum, optimalizácia dopravy

1. Súčasný stav získavania dát

Pre potreby projektovania systému verejnej hromadnej dopravy v zmysle návrhu kapacity, vedenia liniek, časových polôh prostriedkov MHD, riešenia prípojných väzieb atď, sú z hľadiska stanovenia prepravného dopytu elementárnym zdrojom informácií údaje o pohyboch cestujúcich. V súčasnej dobe sa informácie o vykonávaných cestách získavajú dopravnými prieskumami. Dopravné prieskumy sa u nás vykonávajú podľa technického predpisu TP102 [1] - Výpočet kapacít pozemných komunikácií, pričom aktuálne je chystaná jeho novelizácia [2]. Tento technický predpis v bode 3.3.1 rozdeľuje prieskumy na:

- základné prieskumy individuálnej a hromadnej dopravy v rôznych úrovniach,
- prieskum automobilovej a hromadnej dopravy zápisom evidenčných čísel vozidiel,
- prieskum chodcov,
- prieskum parkovania vozidiel,
- prieskum cyklistickej dopravy.

¹ Ing. Marek Braniš, Katedra dopravných stavieb, SvF STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Napriek vyššie uvedenému rozdeleniu, TP 102 pojednáva len o prieskumoch, s cieľom zistenia intenzity dopravy resp. chodcov. Vozidlo hromadnej dopravy toto TP uvažuje len ako vozidlo určitých rozmerových a jazdných charakteristík bez toho, aby sa bližšie zaoberalo zisťovaním jeho skutočnej obsadenosti. Rozsah a priebeh dopravných prieskumov týkajúcich sa vozidiel VHD, resp. ich cestujúcich, je preto podriadený potrebám konkrétneho subjektu vykonávajúceho prieskum bez akejkoľvek metodiky stanovenej technickým predpisom. V našich podmienkach prebieha zber údajov prevažne manuálne a ich analýza analogicky. V súčasnosti vykonávané dopravné prieskumy vo VHD možno podľa vzťahu k riešenému územi, podľa zisťovaných charakteristík a podľa rozsahu zisťovania, rozdeliť do 3 základných kategórií:

1. profilové prieskumy (hladinové): na danej zastávke zaznamenáva pracovník údaje o počte cestujúcich (príjazd, výstup, nástup, čas odjazdu), spravidla všetkých prechádzajúcich spojov do prieskumného hárku,
2. vozové prieskumy: pracovník sa v rámci prieskumu prepravuje vo vozidle ako bežný cestujúci a na každej zastávke zaznamenáva do priloženého formulára údaje o počtoch cestujúcich (príjazd, výstup, nástup, čas odjazdu). Týmto spôsobom sa dlhodobo merali obsadenosti vybraných spojov na linkách, prípadne obsadenosť všetkých spojov danej linky.
3. skladba cestovných dokladov vo vozidle VHD: pracovník zapisuje do prieskumného hárku jednotlivé druhy cestovných dokladov vo vozidle VHD. Vo vlakoch sa tieto prieskumy často vykonávajú aj v spolupráci s vlakovou čatou a pri spojoch MHD v spolupráci s revízormi.

Rozdelenie prieskumov na základe charakteristík je správne a vychádza z potrieb konkrétnych subjektov. Nie je mu teda čo vytknúť. Metodika zberu dát pri uvedených prieskumoch je rôzna a líši sa od subjektu, ktorý prieskum realizuje. Zo skúseností môžeme ale konštatovať, že zaužívané metodiky zberu údajov pri dopravných prieskumoch MHD majú podobný charakter, ktorý je podriadený účelu vykonávania prieskumu. Za absentujúci považujeme definovaný rozsah prieskumu zameraného na VHD, ako aj nezadefinované jednotné kritériá vyhodnocovania prieskumov pri profilových a vozových dopravných prieskumoch, kedy je cieľom zistenie obsadenosti vozidiel.

2. Rozsah dopravného prieskumu

Rozšírenie TP 102, prípadne novo navrhovaný technický predpis by mal obsahovať predovšetkým jednotný rozsah prieskumov s uvedením minimálnej dĺžky trvania dopravných prieskumov. Pre krátkodobý prieskum odporúčame pri vozových a profilových dopravných prieskumoch dĺžku trvania minimálne 12 hodín, pričom by prirodzene mala zahŕňať čas ranej dopravnej špičky a poobednej dopravnej špičky. Zvolený deň dopravného prieskumu vychádza z potreby výsledkov a ich využitia. Ak sa jedná o prieskum krátkodobý, v dĺžke trvania jedného dňa, odporúča sa prieskum vykonať v priemerný pracovný deň týždňa, tj. utorok až štvrtok. Na rozdiel od TP 102, ktoré dopravné prieskumy zamerané na obsadenosť VHD nerieši, pri týchto prieskumoch nie je nevyhnutné vynechať dni pracovného pokoja prípadne školských prázdnin, keďže inú intenzitu cestujúcich v tieto dni spravidla reflektuje už samotný cestovný poriadok liniek. Ak to okolnosti vyžadujú (napr. pri plánovaní posilových spojov), je možné s ohľadom na charakter dopravy vykonať krátkodobý dopravný prieskum aj počas piatku, resp. pondelku. Túto skutočnosť je ale nutné pri interpretácii výsledkov prieskumu uviesť.

Pre dlhodobý dopravný prieskum odporúčame dĺžku trvania 6 dní, počas dvoch po sebe idúcich týždňoch. Tak ako pri krátkodobých prieskumoch, je vhodné zvoliť priemerné pracovné dni. Pokiaľ sa jedná o linku, ktorá je prevádzkovaná aj počas dní pracovného pokoja, vybrané dni

smú byť aj dňami pracovného pokoja, pričom vo výsledku je počet týchto dní nutné zohľadniť prostredníctvom koeficientu. Ten sa prepočíta váženým aritmetickým priemerom, ktorý zohľadní počet pracovných dní a počet dní pracovného voľna v danom kalendárnom roku. Výsledný koeficient sa vypočíta podľa vzorca:

$$K = \frac{K_{PD} * PPD + K_S * DPV}{PPD + DPV}$$

kde: K – výsledný koeficient
 K_{PD} – koeficient pracovných dní (výsledok dopravného prieskumu)
 K_S – koeficient soboty (výsledok dopravného prieskumu)
 PPD – počet pracovných dní v danom roku
 DPV – počet dní pracovného voľna v roku

Podmienka: $PPD + DPV = 365$ (v prípade prestupného roka 366)

Pokiaľ sa jedná o personálne zabezpečenie manuálneho dopravného prieskumu, personálne nároky na kvalitné vykonanie takejto formy dopravných prieskumov v podmienkach VHD sú vysoké, pričom každý jeden analogický spôsob získavania údajov má svoje limity, ktoré spočívajú v možnosti ich využiteľnosti na stanovenie prepravného potenciálu.

Pre relevanciu výsledkov pri vozových prieskumoch je nutné sčítačom pokryť každý spoj linky, prípadne ak je interval podľa cestovného poriadku medzi spojmi kratší ako 15 minút, je nutné pokryť sčítačom aspoň každý druhý spoj linky. Spoje nepokryté sčítačom je následne možné dopočítať matematicky na základe obsadenosti predošlého a nasledujúceho spoja. V posledných rokoch manuálnu formu vozových dopravných prieskumov nahrádzajú automatické zariadenia inštalované vo vozidlách, ktoré dokážu zaznamenať údaj o počte nastúpených a vystúpených cestujúcich, tzv. zariadenia APC. Prostredníctvom týchto zariadení je možné vykonávať aj dlhodobé dopravné prieskumy spoľahlivo.

3. Obsadenosť vozidiel ako kritérium hodnotenia

Súčasne platné TP 102 obsadenosť akýchkoľvek vozidiel vôbec nerieši. Pri profilových a vozových prieskumoch vo VHD je cieľom zistenie aktuálnej obsadenosti vozidiel na jednotlivých linkách. Vyhodnotenie prieskumu zameraného na obsadenosť vozidiel verejnej dopravy by malo byť na základe jednotne stanovených štandardov obsaditeľnosti pre jednotlivé typy vozidiel MHD. Keďže definovanie obsaditeľnosti vozidiel MHD je významným faktorom, ktorý sa týka na jednej strane kvality poskytovania dopravných služieb (pohodlie pre cestujúcich) a na druhej strane je významným ekonomickým faktorom vstupujúcim do zmluvných vzťahov medzi zriaďovateľom a dopravcom, viaceré mestá resp. dopravcovia majú vypracované svoje štandardy obsaditeľnosti vozidiel, ktoré sa síce medzi sebou v mnohom zhodujú, avšak nie sú jednotné. V týchto dokumentoch je vyjadrená optimálna obsaditeľnosť, ktorá predstavuje hodnotu prijateľnej kultúry cestovania v súčasných podmienkach [3]. Je samozrejmé, že pokiaľ sa má jednať o kvalitný systém MHD, reálne obsadenie vozidiel MHD by nemalo prekračovať hodnoty optimálnej obsaditeľnosti. Pokiaľ je rozsah prevádzky MHD plánovaný na základe dopytu, nemala by reálna obsaditeľnosť vozidiel klesnúť pod hodnoty minimálnej obsaditeľnosti. To neplatí len v prípadoch, keď je linka navrhnutá na základe minimálneho rozsahu ponuky pre obsluhu jednotlivých typov území mesta [4].

Minimálna obsaditeľnosť sa definuje ako reálne obsadenie vozidla v zaťaženom smere s 50%-nou obsadenosťou miest na sedenie. Presné číslo minimálnej obsaditeľnosti sa stanovuje pre každé vozidlo samostatne, v závislosti od počtu miest na sedenie.

Maximálna teoretická obsaditeľnosť pri vozidle MHD je uvádzaná výrobcom a predstavuje teoretickú hodnotu pri zaťažení vozidla 8 osôb/m². Normálna obsaditeľnosť predstavuje hodnotu pri zaťažení 5 osôb/m². S týmito hodnotami rovnako operuje aj koordinátor hromadnej dopravy v Bratislavskom samosprávnom kraji, vid' tab.3.1

Tab.3.1 Maximálna a normálna obsaditeľnosť jednotlivých typov vozidiel (Zdroj: IDS BK)

| Typ vozidla | špecifikácia vozidla | Maximálna teoretická obsaditeľnosť pri 8 os./m ² | Normálna obsaditeľnosť pri 5 os./m ² |
|-------------|----------------------|---|---|
| Električka | Sólo < 15 m | 175 | 110 |
| | Klíbové < 22 m | 152 | 160 |
| | Viacčlánkové < 32 m | 350 | 220 |
| Trolejbus | Sólo < 12 m | 99 | 8 |
| | Sólo < 15 m | 145 | 110 |
| | Klíbové < 19 m | 153 | 130 |
| Autobus | Mini < 8 m | 24 | 20 |
| | Midi < 10 m | 77 | 55 |
| | Midi < 11 m | 85 | 65 |
| | Sólo < 12 m | 99 | 80 |
| | Sólo < 15 m | 145 | 110 |
| | Klíbové < 19 m | 153 | 130 |
| | Klíbové < 20 m | 177 | 140 |

Pri linkách s prímestským charakterom, do 40 km vzdialenosti od mesta, pre zvýšenie komfortu cestujúcich a tým aj štandardu kvality cestovania odporúčame zdefinovať zväčšený pomer medzi sediacimi cestujúcimi a stojacimi cestujúcimi na 4 osoby/m² v čase prepravnej špičky. Počas sedla, večerov a víkendov by po vzore dopravných podnikov zo západnej Európy, mali byť plánované dopravné výkony iba pre sediacich cestujúcich, čo by pri autobusoch znamenalo obsaditeľnosť na úrovni 3,2 osoby/m². Rôznou normálnou obsaditeľnosťou medzi špičkou a sedlom sa dosiahne na jednej strane kvalitnejšia doprava v čase sedla, čím sa očakáva presun časti cestujúcich, ktorí nie sú závislí na presnom časovom rozvrhu do tohto obdobia a zároveň sa odbúrajú tzv. špičkové vozidlá, ktoré sú z ekonomického hľadiska podstatne nevýhodnejšie.

Dopravným prieskumom zistené skutočné hodnoty obsadenosti vozidiel by mali byť hodnotené, v závislosti od charakteru linky, na základe stanovených normálnych hodnôt obsadenosti vozidiel. Výsledkom pri hodnotení by nebol len počet cestujúcich prepravených spojom, resp. celou linkou za určitý časový úsek z miesta A do miesta B, ale rovnako tak vyjadrenie obsadenosti v %, kde celkový počet ponúknutých miest pri normálnej obsaditeľnosti predstavuje 100%.

4. Automatizácia prieskumov v MHD

Je prirodzené, že s nástupom moderných technológií, prichádza snaha zautomatizovať procesy v rámci dopravných prieskumov. V súčasnosti sú náhradou za manuálne vyhotovované vozové prieskumy zariadenia APC. Ide o systém, ktorého súčasťou sú senzory umiestnené nad všetkými dverami, prípadne v ráme dverí vozidla MHD. Tento systém prostredníctvom pohybových

senzorov zaznamenáva počet pohybov vo dverách vozidla, ako aj ich smer pohybu. Systém je priamo prepojený s palubným počítačom vozidla.



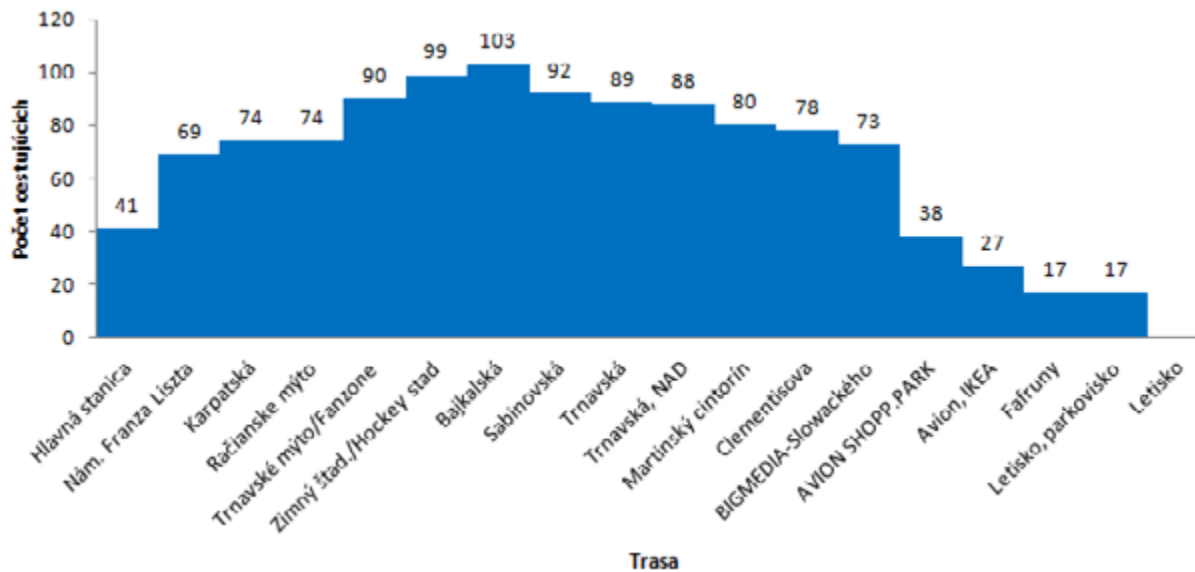
Obr. 4.1 Autobus SOR NB18 vybavený zariadením APC na zisťovanie počtu cestujúcich

Výsledkom je hodnota počtu nastúpených a vystúpených cestujúcich na jednotlivých zastávkach spoja. Tieto hodnoty sa uchovávajú do pamäte palubného počítača. Vozidlá, na ktorých je systém nainštalovaný a správne nastavený, sú schopné od prvého okamžiku zaznamenávať nastupujúcich a vystupujúcich cestujúcich v nepretržitom režime 24/7/365 od momentu vynulovania. Na základe toho už dokáže vyhodnocovací software, pomocou relevantnej vzorky dopočítať prepravovaných cestujúcich aj na ostatných spojoch danej linky. Presne sa tak získajú hodnoty vytťaženia linky na celej jej prevádzkovej trase.

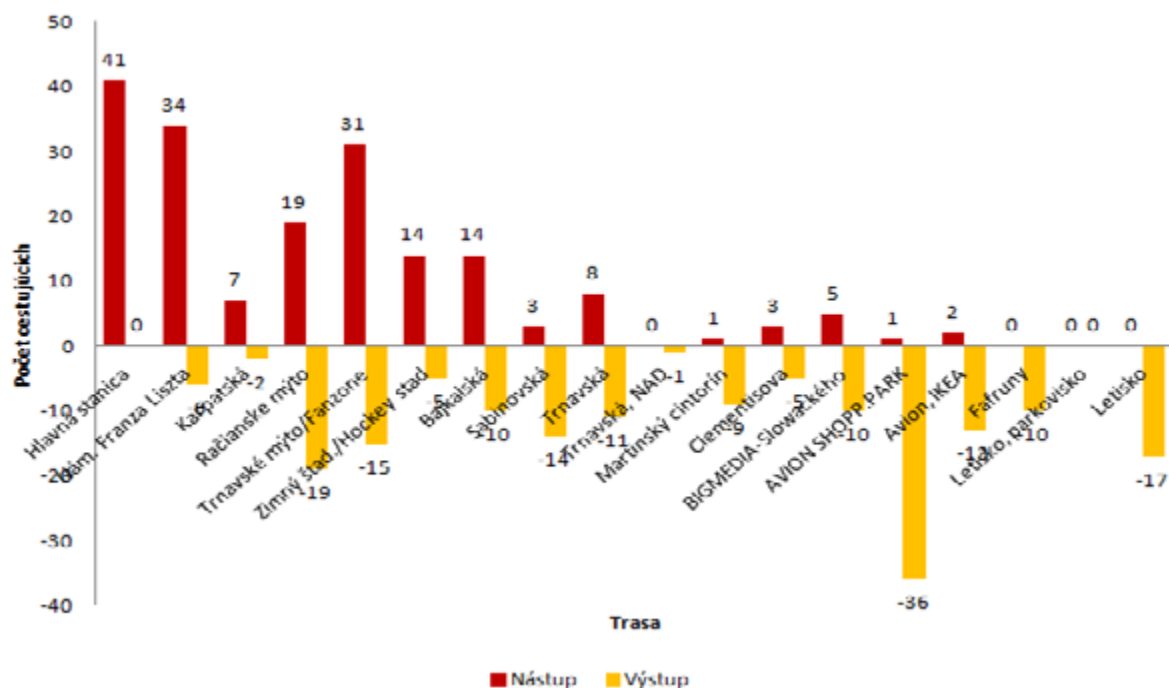
Tab.4.1 Linka 61, smer Hlavná Stanica - Letisko, čas 7:24 až 7:48 - Ranná špička

| Trasa | Čas | Nástup APC | Výstup APC | Nástup | Výstup | Obsadenosť |
|-------------------------|---------|------------|------------|--------|--------|------------|
| Hlavná stanica | 7:24:04 | 821111 | 840207 | | | |
| Hlavná stanica | 7:24:09 | 821112 | 840207 | 41 | 0 | 41 |
| Nám. Franza Liszta | 7:26:57 | 821141 | 840207 | 34 | -6 | 69 |
| Karpatská | 7:28:09 | 821143 | 840209 | 7 | -2 | 74 |
| Račianske mýto | 7:29:58 | 821156 | 840212 | 19 | -19 | 74 |
| Trnavské mýto/Fanzona | 7:31:09 | 821171 | 840222 | 31 | -15 | 90 |
| Zimný štad./Hockey stad | 7:32:39 | 821179 | 840227 | 14 | -5 | 99 |
| Bajkalská | 7:33:43 | 821183 | 840237 | 14 | -10 | 103 |
| Sabinovská | 7:34:38 | 821186 | 840251 | 3 | -14 | 92 |
| Trnavská | 7:35:38 | 821192 | 840262 | 8 | -11 | 89 |
| Trnavská, NAD | 7:37:27 | 821192 | 840263 | 0 | -1 | 88 |
| Martinský cintorin | 7:38:24 | 821193 | 840264 | 1 | -9 | 80 |
| Clementisova | 7:39:18 | 821196 | 840264 | 3 | -5 | 78 |
| BIGMEDIA Slowackého | 7:40:55 | 821201 | 840274 | 5 | -10 | 73 |
| AVION SHOPP.PARK | 7:44:13 | 821202 | 840298 | 1 | -36 | 38 |
| Avion, IKEA | 7:44:59 | 821202 | 840308 | 2 | -13 | 27 |
| Fafruny | 7:46:24 | 821202 | 840317 | 0 | -10 | 17 |
| Letisko, parkovisko | 7:47:16 | 821202 | 840319 | 0 | 0 | 17 |
| Letisko | 7:48:58 | 821202 | 840325 | 0 | -17 | 0 |

Z uvedeného výstupu sme vytvorili grafickú interpretáciu obsadenosti spoja po trase linky č. 61, obr. 4.2. Počet nastúpených a vystúpených cestujúcich je zreteľný z obr., 4.3. Jedná sa však len o interpretáciu obsadenosti jedného spoja, z celkového počtu 71 spojov linky č.61 prevádzkovaných počas pracovných dní, s výnimkou školských prázdnin.



Obr.4.2: Graf obsadenosti spoja, linka 61, čas 7:24 - 7:48



Obr.4.3: Graf nastúpených a vystúpených cestujúcich, linka 61, čas 7:24 - 7:48

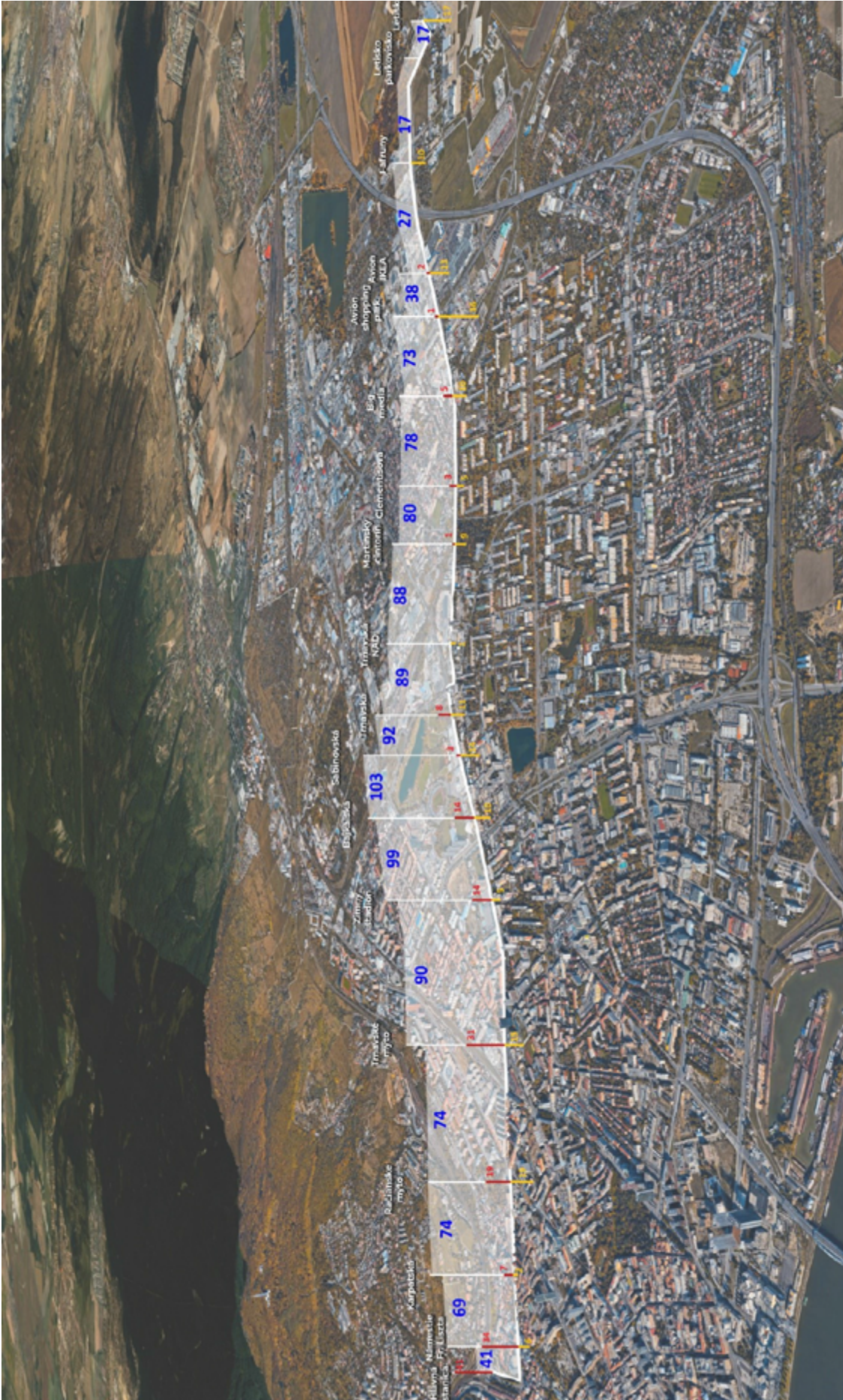
Z grafického vyhodnotenia vidieť, že spoj bol najviac obsadený medzi zastávkami Bajkalská a Sabinovská, kedy sa vo vozidle nachádzalo 103 cestujúcich. Pri porovnaní s tzv. normálnou obsaditeľnosťou vozidiel z tabuľky 3.1., vieme že pre daný typ vozidla SOR NB18 (kĺbový autobus dĺžky 18,75 m) obr. 4.1., je normálna obsaditeľnosť 130 cestujúcich. Najvyššia obsadenosť uvedeného spoja predstavovala teda 79,2 %.

5. Nedostatky hodnotenia

Nevýhodou systému APC je to, že princíp jeho fungovania umožňuje operovať len s hodnotou nastúpených a vystúpených cestujúcich na príslušných zastávkach a teda z jeho použitia nie sú zrejmé medzioblastné vzťahy. Zisťovanie týchto skutočností je preto aj naďalej nutné organizovať manuálnymi anketovými dopravnými prieskumami, v rámci ktorých zisťujeme zdroj a cieľ cesty cestujúcich, čas, za ktorý túto cestu vykonali, počet prestupných miest, prípadne typy využitých dopravných prostriedkov. Pri interpretácii zozbieraných údajov pri zisťovaní medzioblastných vzťahoch má preto najväčší prínos mať k dispozícii množinu údajov z manuálneho dopravného prieskumu a doplniť ju dátami vygenerovanými zo systému APC. Takto získaný výsledný súbor údajov je za použitia súčasne dostupných možností, pre ďalšie činnosti dopravného plánovania najpresnejší. Ide však o náročný proces z hľadiska času ako aj z hľadiska ľudských zdrojov pri manuálnej časti dopravného prieskumu a ďalšom párovaní údajov s výstupmi zo systémov APC z konkrétnych vozidiel. Z doterajšieho spôsobu získavania údajov vyplývajú ich limity, spočívajúce v stanovení prepravných potenciálov:

- na základe získaných údajov nemožno identifikovať medzioblastné vzťahy na zadanom území,
- prieskumy sú závislé na aktuálnom linkovom vedení MHD,
- v dôsledku rozdelenia na geografické oblasti a časovú náročnosť, nemožno mať ucelený prehľad o dopravnom systéme v jednom časovom okamžiku.

Na obr. 5.1 je ukážka implementácie výsledkov vyťaženia spojov prostredníctvom grafu, vedením priamo po trase linky a vykresleným do mapového podkladu s cieľom názornejšie zobrazit' obsadenosť linkospoja, naprieč jednotlivými časťami mesta.



Obr. 5.1.: Graf obsadenosti spoja, nastúpených a vystúpených cestujúcich, linka 01, čas 7:24 - 7:48

Pri dopravných prieskumov zameraných na MHD je nevyhnutné uviesť si, že získané údaje zohľadňujú len dopravné správanie osôb využívajúcich MHD. Je preto chybou, pokiaľ sa na základe týchto údajov určujú celkové objemy ciest realizovaných medzi zdrojom a cieľom. Je preto dôležité stanoviť ešte pred vykonaním dopravného prieskumu jasný cieľ, ktorý daným prieskumom chceme overiť. Ak by sme chceli stanoviť celkový prepravný potenciál liniek a spojov v jednotlivých reláciách medzi zdrojom a cieľom, je nutné prieskum týkajúci sa len vozidiel MHD, rozšíriť aj o iné možné spôsoby dopravy a to vrátane pešej. Komplexná znalosť týchto informácií je pre optimálny návrh systému verejnej hromadnej dopravy kľúčová, pretože reprezentuje reálne dopravné správanie obyvateľstva.

6. Záver

V posledných rokoch sme svedkami zvyšujúcimi sa nárokmi na mobilitu (prepravu) v kombinácii s dynamickými zmenami na území. Tieto potreby korešpondujú s cieľmi, aby bol systém MHD atraktívnou alternatívou k IAD a aby sa naplnili globálne ciele posilnenia konkurencieschopnosti MHD. Tieto ciele sa definujú v strategických dokumentoch na národnej úrovni:

- Zásady štátnej dopravnej politiky SR [5],
- Stratégia rozvoja dopravy Slovenskej republiky do roku 2020 [6],
- Rozvoj verejnej osobnej dopravy pred dopravou individuálnou [7],
- VOD 2030 [8].

Ako je z uvedeného zrejmé, je teda aj v národnom záujme, aby bola stanovená jednotná metodika, pre zaznamenávanie a hodnotenie kvality verejnej hromadnej dopravy ako služby vo verejnom záujme, ktorá bude transparentná a jasne zakotvená v dokumente platnom na národnej úrovni. Zároveň je nevyhnutné uviesť si, že každý jeden dopravný prieskum so sebou prináša určité limity pri interpretácii údajov a dopravné prieskumy zamerané na MHD nie sú výnimkou. V rámci všetkých druhov vykonávaných prieskumov, tvoria ale významnú množinu, ktorej výstupom sú údaje potrebné z hľadiska optimalizácie dopravy vo verejnom priestore, a to nielen na zlepšenie verejnej hromadnej dopravy, ale aj na zníženie objemu a negatívneho dopadu individuálnej automobilovej dopravy v našich mestách.

Príspevok vznikol s podporou projektu Vega 1/0501/17

Literatúra

- [1] TP 102 - Výpočet kapacít pozemných komunikácií, Ministerstvo dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja SR, Sekcia cestnej dopravy a pozemných komunikácií, 31.12.2015
- [2] Skúsenosti so smerovými dopravnými prieskumami a návrh TP, XXIII. seminár I.Poliačka 11/2018
- [3] Štandardy dopravnej obsluhy na území hlavného mesta SR Bratislava, Materiál na rokovanie Komisie dopravy a informačných systémov hlavného mesta SR Bratislavy dňa 15.06.2015
- [4] STN EN 15140 Verejná osobná doprava - Základné požiadavky a odporúčania na systémy na meranie poskytovanej kvality služieb, November 2006
- [5] Zásady štátnej dopravnej politiky SR
- [6] Stratégia rozvoja verejnej osobnej a nemotorovej dopravy SR do roku 2020, Ministerstvo dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja Slovenskej republiky, 2013

[7] Rozvoj verejnej osobnej dopravy pred dopravou individuálnou, uznesenie vlády č. 675/2008, 01.10.2008

[8] J Vod 2030, Ministerstvo dopravy a výstavby Slovenskej republiky, apríl 2017

Jakub Dobrý¹

Študijný program: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: 3

POROVNANIE VÝSLEDKOV MERANÍ DEFORMÁCIÍ EXPERIMENTÁLNE OVEROVANÝCH STĽPOV

COMPARISON OF DEFORMATIONS MEASUREMENTS OF EXPERIMENTALY TESTED COLUMNS

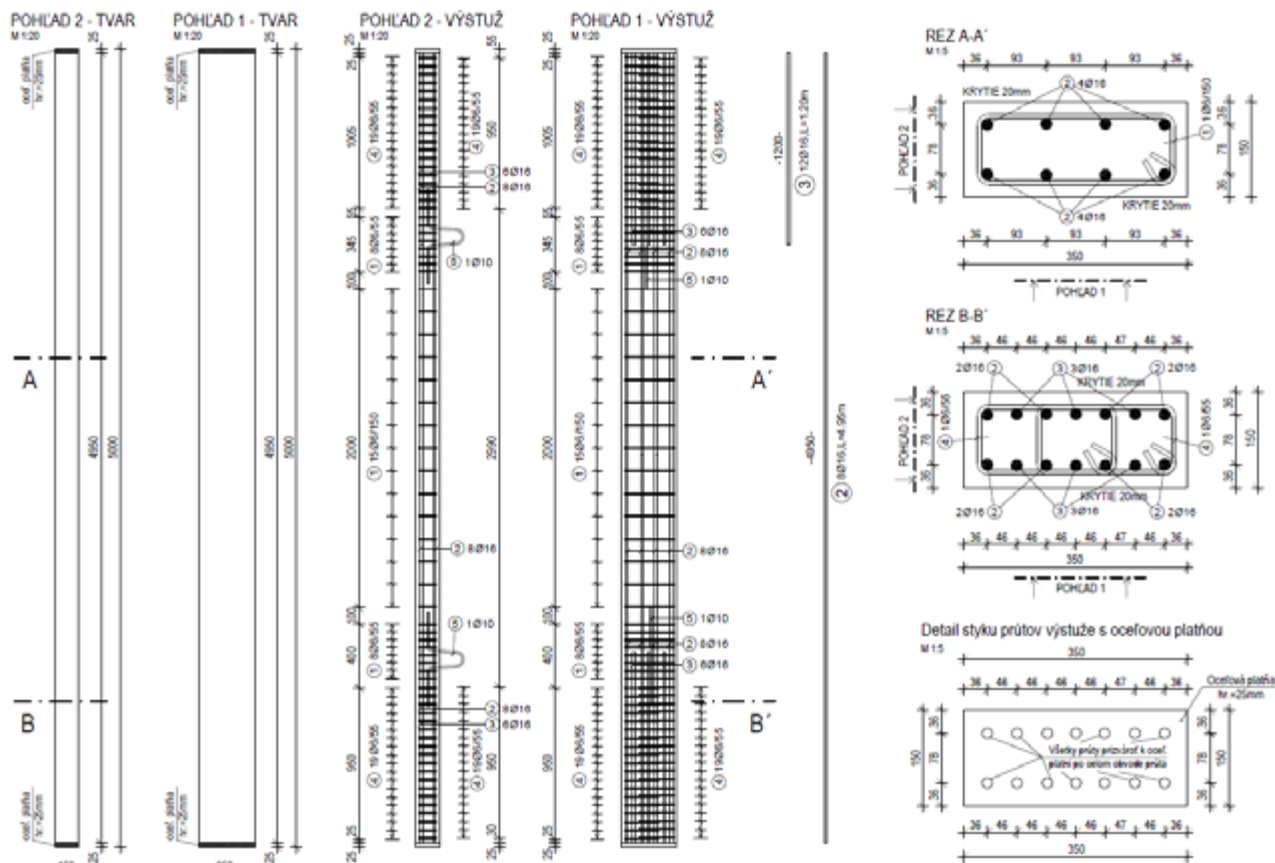
Abstract

European code for design of concrete structures that, are likely to lose stability requires to take into the account effects of a second order. Increase of bending moment due to second order effect can be calculated with three methods. Approach based on general nonlinear method shows deficit of global reliability for cases, when the concrete columns fail by the stability loss before reaching the design resistance in the critical cross-sections. Because of this, experimental verifications of slender columns were performed in laboratories of TU Wien in Vienna. From previous experiences, we wanted to cross check every measurement and for measuring deformations along the columns we have chosen method called technology of terrestrial laser scanning (TLS). Aim of this paper is to show comparison of experimental results of slender columns deformations from LVDT unites and TLS scans.

1. Úvod

Tento článok je zameraný na porovnanie výsledkov deformácií pozdĺž testovaného stĺpa z dvoch rôznych meracích prístrojov. Testované stĺpy boli skúmané z dôvodu umiestnenia všeobecnej nelineárnej metódy pre zohľadnenie teórie druhého rádu v norme pre návrh železobetónových stĺpov. Štíhle stĺpy môžu v istých prípadoch zlyhať na stratu stability vo vnútri ich interakčného diagramu. Strata stability stĺpov je zlyhanie krehkého charakteru, čo znamená, že nastáva náhle a bez známok blížiacej sa poruchy. Stabilítne zlyhanie sa vyskytuje predovšetkým na štíhlych prvkoch, aj z tohto dôvodu je pri ich výpočte potrebné zohľadniť vplyv teórie druhého rádu. V praxi sa využívajú najmä metódy nominálnej tuhosti a nominálnej krivosti. Tieto metódy sú pomerne jednoduché a vykazujú veľkú spoľahlivosť aj pri vysokých štíhlostiach nosných prvkov. Treťou metódou zohľadnenia vplyvov teórie druhého rádu je všeobecná nelineárna metóda. Táto metóda sa preukázala ako najefektívnejšia, ale na druhej strane aj najnebezpečnejšia. Nelineárne výpočty vyžadujú veľké množstvo skúseností a na základe predošlých odborných prác venujúcich sa tejto problematike je zrejmé, že ani skúsenosti nie sú zárukou správneho výsledku. Kvôli vyššie spomínaným dôvodom sme sa snažili o čo najväčšiu precíznosť výsledkov čomu domohlo kontrolovanie výsledkov meracích jednotiek viacerými spôsobmi. Porovnávané deformácie boli merané vysúvacími meracími prístrojmi (LVDT) a technológiou terestrického laserového skenovania za pomoci kolegov z katedry Geodézie.

¹ Jakub, Dobrý, Ing., Radlinského 11, 810 05 Bratislava

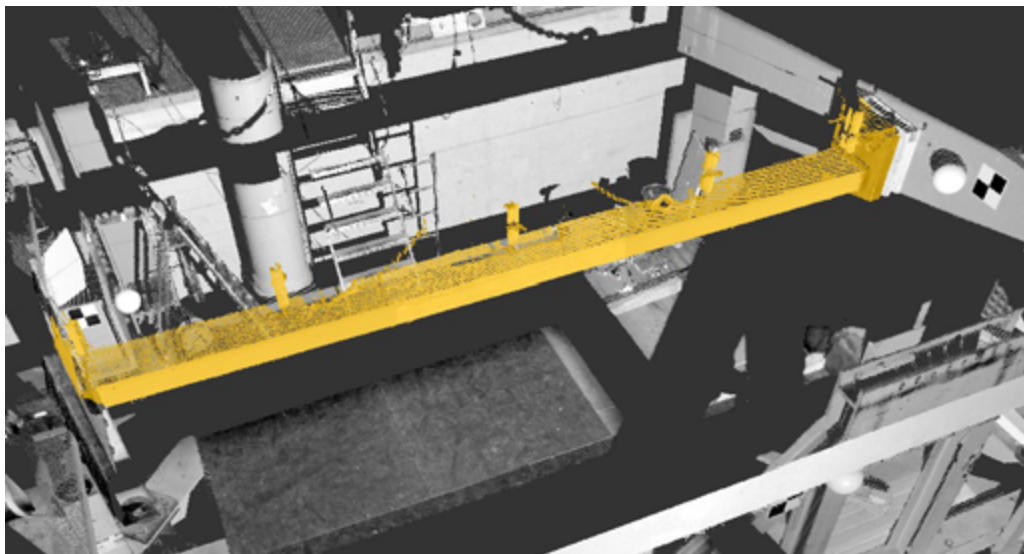


Obrázok 1: Schéma tvaru a výstuženía stĺpov.

2. Technológia terestrického laserového skenovania

Využitie tejto technológie bolo možné s pomocou kolegov z katedry Geodézie Ing. Richarda Hontiho a doc. Ing. Jána Erdélyiho, PhD. Stĺpy boli skenované v istých zaťažovacích krokoch. Po dosiahnutí zaťažovacieho kroku sa počkalo na ustálenie deformácií a previedli skenovanie. Meranie bolo realizované pomocou laserového skenera Trimble® TX5 3D. Sieť referenčných bodov bola tvorená cieľovými značkami (sférické cieľové značky a čiernobiele šachovnicové cieľové značky) rozmiestnenými v celom priestore skenovaného objektu. Tieto body slúžili na kontrolu stability skenera na stanovisku a pre prípadnú transformáciu mračien bodov do spoločného súradnicového systému. Transformácia nebola potrebná, keďže poloha skenera v jednotlivých epochách sa nezmenila, čo bolo určené na základe súradnicových rozdielov bodov referenčnej siete medzi jednotlivými etapami.

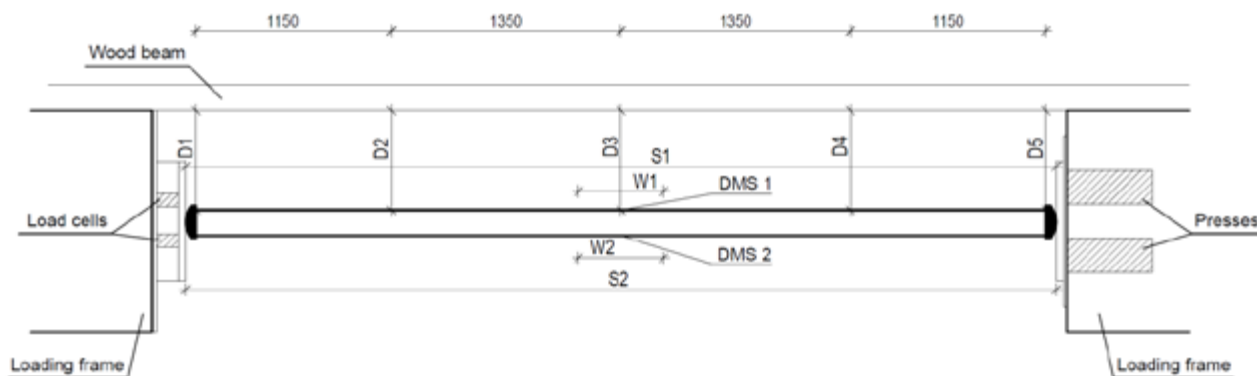
Skenovanie bolo vykonané v niekoľkých etapách s krokmi zaťaženia uvedenými v Tabuľke 1. Meranie bolo zamerané na určenie pretvorenia testovaných železobetónových stĺpov. V každej etape zaťaženia po ustálení bolo vykonané skenovanie hornej a bočnej steny daného stĺpa z jedného stanoviska skenera. Maximálna vzdialenosť medzi skenerom a testovaným stĺpom bola menej ako 5 m a meranie dĺžok počas skenovania bolo vykonané v 3 opakovaníach. Minimálna hustota meraných bodov na povrchu skenovaného objektu bola 2,5 x 2,5 mm. Presnosť meranej vzdialenosti s daným skenerom dosahuje 2 mm na 10 m. S uvedeným prístrojom a uvážením podmienok počas skenovania, presnosť určenia priestorovej polohy meraného bodu bola lepšia ako 1,2 mm vo všetkých prípadoch. Hlavnou úlohou spracovania mračien bodov bolo určenie pretvorenia testovaných stĺpov. Pretvorenie bolo určené na základe porovnania mračien bodov daného stĺpa z niekoľkých etáp merania. Všetky výsledky z týchto meraní boli spracované kolegami s katedry Geodézie.



Obrázok 2: Mračno bodov zaťažovacej zostavy

3. Meracia a zaťažovacia zostava experimentu.

Na experimentálne overenie našich úvodných numerických nelineárnych analýz bolo použité laboratórium Technickej univerzity vo Viedni. Dôvod presunutia experimentálneho overovania z centrálnych laboratórií STU v Bratislave je zastarané vybavenie laboratória a nemožnosť zaťažovania experimentálnych vzoriek kontrolovanou deformáciou a nie silou. V tomto laboratóriu je lis schopný vyvinúť osovú silu o veľkosti 17,5 MN a je do neho možné umiestniť prvok o dĺžke 5m. V nasledujúcom obrázku možno vidieť zaťažovaciu zostavu experimentu. Všetky merané veličiny bolo možné kontrolovať na základe iných meraní.



Obrázok 3: Schéma zaťažovacej zostavy

Na obrázku môžete vidieť ako sme vedeli kontrolovať pomerné pretvorenie horného a dolného povrchu pomocou LVDT (W1,W2) a tenzometrických pásovk (DMS1,DMS2), stlačenie stĺpa a prípadné natočenie zaťažovacích platní pomocou LVDT (S1,S2) a údajov z lisov ktoré nám oznamovali ich vysunutie. Silu v stĺpoch sme vedeli kontrolovať na základe silomerov a údajov prepočítaných z tlaku oleja v lisoch. Jediné merania ktoré sme nevedeli skontrolovať boli pozdĺžne deformácie, ktoré sme merali pomocou spomínaného skenovania.

4. Porovnanie výsledkov meraní

4.1 Zaťažovacie kroky

Ako som už spomínal v úvode článku, zaťažovanie a odčítavanie výsledkov deformácií prebiehalo v istých zaťažovacích krokoch. Zaťažovacie kroky neboli rovnaké pri každom zo stĺpov, keďže sa predpokladala iná pevnosť materiálu ako bola v skutočnosti. Prehľad zaťažovacích krokov možno nájsť v tabuľke 1.

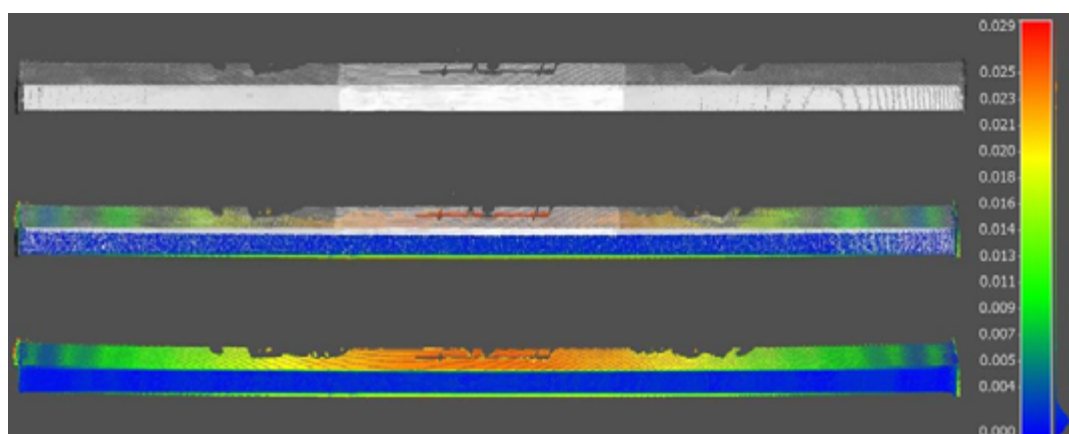
Tabuľka 1: Prehľad zaťažovacích krokov

| Ep. | Zaťažovací stupeň [kN] | | | |
|-----|------------------------|--------|--------|--------|
| | Stĺp 1 | Stĺp 2 | Stĺp 3 | Stĺp 4 |
| 1 | 111 | 94 | 103 | 106 |
| 2 | 589 | 396 | 394 | 398 |
| 3 | 735 | 541 | 588 | 587 |
| 4 | 846 | 684 | 643 | 641 |
| 5 | - | 804 | 694 | 693 |
| 6 | - | - | 735 | 736 |
| 7 | - | - | 785 | 765 |
| 8 | - | - | 820 | 795 |
| 9 | - | - | 820 | 817 |

4.2 Odčítavanie výsledkov

Spracovanie mračien bodov bolo vykonané kolegom Ing. Richardom Hontim vo výpočtovom softvari. V prvom kroku bola vykonaná segmentácia bodov ležiacich na povrchu testového stĺpa z meraného mračna bodov. Následne boli segmentované mračná bodov z jednotlivých etáp zaťaženia porovnané s referenčným mračnom bodov, ktorý bol meraný na začiatku zaťaženia pri sile zaťaženia približne 100kN. Zaťaženie o hodnote 100kN bolo zvolené na základe malých deformácií testovanej vzorky a nehrozilo pri ňom posunutie stĺpa v zaťažovacom ráme. V ďalšom kroku bol určený rozdiel medzi mračnami bodov ležiacimi na povrchu testovaného stĺpa v jednotlivých etapách, ako vzdialenosti najbližších susedov, t. j. pre každý bod mračna bol nájdený najbližší sused (najbližší bod mračna) v referenčnom mračne a určila sa vzdialenosť medzi týmito dvomi bodmi.

V poslednom kroku bola modelovaná poloha pozorovaných bodov z 5 najbližších bodov mračna (segmentovaných z mračien bodov) v miestach, kde sa vykonávalo meranie pomocou jednotiek LVDT. Následne sa určili zvislé posuny týchto bodov vo všetkých epochách. Výsledky boli použité na porovnanie výsledkov TLS s údajmi z LVDT jednotiek (na verifikáciu údajov).



Obrázok 4: Odčítavanie výsledkov TLS meraní.

4.3 Porovnanie výsledkov

Výsledky porovnania sú uvedené v Tabuľke 2 pre druhý stĺp a Tabuľke 3. pre posledný (4.) stĺp. Najväčší rozdiel medzi dvomi uvedenými metódami dosahovala 1,1 mm v oboch prípadoch, čo je pod úrovňou presnosti určenia priestorovej polohy meraného bodu pomocou použitého prístroja.

Na obrázku 4 je zobrazené referenčné mračno bodov druhého testovaného stĺpa, v strede je znázornené referenčné mračno spolu s mračnom z poslednej etapy (5.) zaťaženia. Dole je znázornené mračno bodov vyjadrujúce rozdiel medzi uvedenými mračnami. Farby k bodom mračna (dole) je priradená na základe vzdialenosti najbližších susedov (rozdielov medzi dvomi mračnami), vyjadrujúci pretvorenie testovaného železobetónového stĺpa. Maximálny posun v strednej časti stĺpa dosiahla hodnotu 28,1 mm a na koncoch stĺpa 1,8 mm. Hodnoty posunov s porovnaním s hodnotami získanými z meracích jednotiek LVDT sú uvedené v Tabuľke 2.

Tabuľka 2: Výsledky pre stĺp č.2

| Porovnanie výsledkov z LVDT meracích jednotiek s TLS meraniami pre stĺp č.2 | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|
| Ep. | Load Stage [kN] | D1 [mm] | TLS1 [mm] | D2 [mm] | TLS2 [mm] | D3 [mm] | TLS3 [mm] | D4 [mm] | TLS4 [mm] | D5 [mm] | TLS5 [mm] |
| 1 | 94 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 2 | 396 | 0,2 | 1,0 | 3,3 | 3,7 | 5,2 | 6,3 | 3,5 | 3,3 | 0,3 | 0,9 |
| 3 | 541 | 0,2 | 1,1 | 5,6 | 5,9 | 8,7 | 8,7 | 5,8 | 6,2 | 0,4 | 1,2 |
| 4 | 684 | 0,1 | 1,0 | 9,9 | 10,6 | 15,1 | 14,3 | 9,9 | 9,8 | 0,7 | 1,4 |
| 5 | 804 | 0,7 | 1,5 | 17,5 | 18,5 | 27,0 | 28,1 | 17,3 | 18,4 | 1,2 | 1,8 |

Tabuľka 3: Výsledky pre stĺp č.4

| Porovnanie výsledkov z LVDT meracích jednotiek s TLS meraniami pre stĺp č.4 | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|
| Ep. | Load Stage [kN] | D1 [mm] | TLS1 [mm] | D2 [mm] | TLS2 [mm] | D3 [mm] | TLS3 [mm] | D4 [mm] | TLS4 [mm] | D5 [mm] | TLS5 [mm] |
| 1 | 106 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 2 | 398 | 0,3 | 0,7 | 2,5 | 2,9 | 4,0 | 4,5 | 2,6 | 3,4 | 0,2 | 0,2 |
| 3 | 587 | 0,4 | 0,9 | 5,1 | 6,1 | 7,8 | 8,4 | 5,1 | 6,1 | 0,4 | 0,6 |
| 4 | 641 | 0,4 | 1,0 | 6,1 | 6,4 | 9,4 | 9,8 | 6,0 | 6,2 | 0,4 | 0,6 |
| 5 | 693 | 0,3 | 0,8 | 7,2 | 7,3 | 11,0 | 11,0 | 7,1 | 7,4 | 0,5 | 0,9 |
| 6 | 736 | 0,2 | 1,1 | 8,7 | 8,5 | 13,1 | 13,7 | 8,4 | 8,9 | 0,6 | 1,1 |
| 7 | 765 | 0,2 | 0,8 | 9,7 | 9,3 | 14,8 | 14,4 | 9,5 | 9,5 | 0,7 | 1,2 |
| 8 | 795 | 0,1 | 0,9 | 11,2 | 11,4 | 17,1 | 16,6 | 10,9 | 11,2 | 0,8 | 1,2 |
| 9 | 817 | 0,0 | 0,8 | 12,9 | 12,5 | 19,8 | 19,1 | 12,5 | 12,8 | 0,9 | 1,1 |

Hodnoty posunov s porovnaním s hodnotami z LVDT jednotiek sú súčasťou Tabuľky 3 pre stĺp číslo 4. Maximálna hodnota posunov v strede prvého testovaného stĺpa dosiahla 23,5 mm (na konci stĺpu 1,6 mm) a tretieho stĺpa 28,9 mm (na konci 1,7 mm). Výsledky získané spracovaním mračien bodov získaných technológiou TLS popisujú pretvorenie lepšie, keďže poskytujú komplexný obraz o pretvorení celého testovaného stĺpa. Porovnania výsledkov pre prvý a tretí stĺp neboli publikované vzhľadom na obmedzený rozsah článku.

Maximálny rozdiel medzi uvedenými metódami v prípade prvého testovaného stĺpa bol 1,0 mm a 1,2 mm v prípade tretieho stĺpa. Tieto hodnoty sú tiež pod uvedenou presnosťou merania pomocou TLS.

5. Záver

Experiment týkajúci sa straty stability štíhlych železobetónových stĺpov bol veľmi náchylný na presnosť dosiahnutých výsledkov a preto bol pri ňom kladený veľký dôraz na precíznosť. Na základe prezentovaných výsledkov možno konštatovať že overenie výsledkov meraní použitou metódou laserového skenovania prebehlo úspešne. Maximálne rozdiely výsledkov meraní sú na úrovni 1,2mm čo je pri maximálnej deformácii stĺpa okolo 30mm dobrý výsledok, vzhľadom na to že tento rozdiel sa pohybuje na úrovni 4%. Namerané výsledky sú pod hranicou presnosti meraní prístroja čo dokazuje ich kvalitu. Doporučil by som podobné merania ako súčasť ďalších experimentov, kde je kladený veľký dôraz na správnosť dosiahnutých výsledkov.

Použitá literatúra

BENKO,V.; a kol.: Failure of slender concrete columns of loss of stability. *Key Engineering Materials : Reliability Aspects in the Design and Execution of Concrete Structures*. Vol. 691, (2016), s. 185-194. ISSN 1013-9826.

BENKO, V.; STRAUSS, A., TAUBLING, B., VALAŠÍK A., ČUHÁK, M., a kol.:., Reliability of slender columns, *Beton - und Stahlbeton*, vol. 112, 2017

KENDICKÝ, P.: Analýza štíhlych betónových stĺpov. *Advances in archit. civil and environm. eng.:* STU v Bratislave, 2015, ISBN 978-80-227-4514-7.

EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules buildings.

BENKO, V.: Nichtlineare Berechnung von Stahlbetondruckglieder. (Nonlinear analysis of reinforced concrete compression members). In.: *Innovationen im Betonbau 27*. Fortbildungsveranstaltung, OVBB Heft 47, s. 9–12.

BENKO, V. A KOL.: Failure of Slender Columns of Loss of stability. *Journal of Composites for Construction ASCE*.

BENKO, V., DOBRÝ, J., ČUHÁK, M.: Slender Concrete Columns at the loss of Stability. In: fib 2018 - Better, Smarter, Stronger. Lausanne: Fédération internationale du béton (fib), 2018, ISBN 978-1-877040-14-6.

DOBRÝ, J., ČUHÁK, M., ČÍŽEK, P., BENKO V.: Nonlinear Analysis and Comparison of Design Methods for Slender Concrete Columns with their Impact on Economy and Reliability. In: *Solid State Phenomena*, Vol. 292, pp. 197-202, 2019

BENKO, V., DOBRÝ, J., ČUHÁK, M.: Failure of slender concrete columns due to a loss of stability. In: *Slovak Journal of Civil Engineering*. Vol:27. s. 45--51.

HONTI, R. -- ERDÉLYI, J. -- DOBRÝ, J. Využitie technológie TLS pri statickej zaťažovacej skúške železobetónových stĺpov. In HURČÍKOVÁ, V. -- MOLČÍKOVÁ, S. *Geodézia, kartografia a geoinformatika 2019*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2019, ISBN 978-80-553-3340-3.

Peter Havlíček, Ing.

Študijný program: D-TKeIS4 teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 4. ročník.

ŠMYKOVÁ ODOLNOSŤ BETÓNOVÉHO ROZHRAINIA – REŠERŠ ODBORNEJ LITERATÚRY

SHEAR RESISTANCE OF CONCRETE INTERFACE - TECHNICAL LITERATURE OVERVIEW

Abstract

Interface shear transfer between differently aged concretes is a topic that crops up frequently and in different situations in structural design. In the fib Model Code for Concrete Structures 2010 [1] the fundamental basics of concrete-to-concrete load transfer are given in fib Model Code 2010 [9]. The different potential mechanisms contributing to the shear resistance along the interface, i.e. adhesive bond, aggregate interlock, friction and dowel action, are thus combined and their relationship taken into account by interaction factors. This article presents the most important results from ongoing studies and presents the basics to the theory forming the design recommendations of fib Model Code 2010, the “extended shear friction theory”.

Kľúčové slová

Šmyková odolnosť, teória šmykového trenia, vrubové kĺby

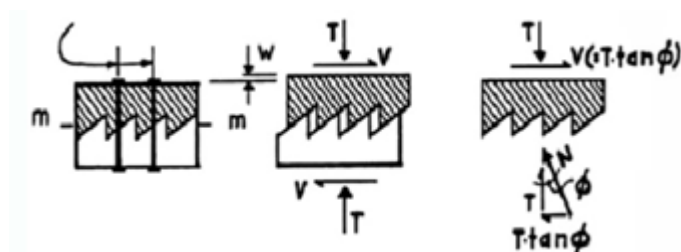
1. Úvod

Betónové kĺby sú schopné prenášať extrémne vysoké zaťaženia a deformácie, pričom vyžadujú len minimálne nároky na údržbu a pri správnom návrhu splňajú aj najvyššie nároky na trvanlivosť a odolnosť konštrukcie. Použitím betónových kĺbov je možné jednoducho a spoľahlivo kontrolovať tok síl a tým efektívne redukovať požiadavky na odolnosť konštrukčných prvkov. Vrbové kĺby sú viac ako 130 rokov starým konceptom a medzi najznámejších odborníkov na túto technológiu patrili Fritz Leonhardt, E.O. Fessler alebo G.D. Base pričom ich výskumy boli podkladom pre tvorbu dnes používaných návrhových postupov [4][5]. Tieto postupy stanovujú napríklad maximálna dovolená deformácia kĺbu alebo prierezovú plochu hrdla, ale neumožňujú posúdiť šmykovú odolnosť takéhoto spoja. Tak isto je väčšina vzťahov založená na polo-empirických závislostiach a nezodpovedajú aktuálnym európskym normám a preto je dnes vo svete snaha o ich modernizovanie. Modifikácia Leonhardtového modelu do podoby eurokódu bola vykonaná nemeckými inžiniermi Steffen Marx a Gregor Shaft [2] [3]. Šmyková odolnosť nie je v tomto modeli riešená, ale vzhľadom na geometriu konštrukcie a spôsob namáhania je možné použiť napríklad vzťahy pre šmykovú odolnosť rozhrania betón - betón z model kódu 2010 [9].

2. Súčasný stav poznania

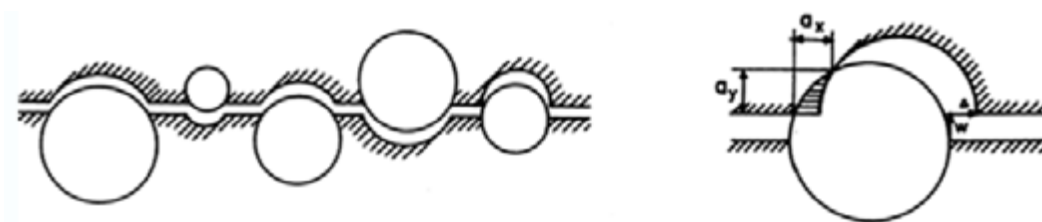
Výskum šmykovej odolnosti a prenosu síl na rozhraní betón – betón začal v 60. rokoch. Množstvo rozsiahlych výskumov malo za cieľ stanoviť odolnosť šmykového rozhrania a poskytnúť spoľahlivé odporúčania pre návrh a zhotovovanie. Záverom týchto experimentov bola „Teória šmykového

trenia“ prvý krát formulovaná koncom 60. rokov v USA [11]. Táto teória bola založená na „pílovom modeli“ šmykového rozhrania (obr.1). Podľa tohto modelu spôsobuje šmykové namáhanie nie len horizontálnu deformáciu ale aj roztváranie šmykovej trhliny čo spôsobuje vznik ťahových napätí vo výstuži ktorá prechádza rozhraním. To naopak spôsobuje vznik opačných tlakových napätí na v trhline čo umožňuje aktiváciu trecích síl.



Obrázok 1: Teória šmykového trenia a „pílový model šmykového rozhrania“ [11].

Prelomom v tejto problematike, bol výskum J. C. Walravena, ktorý vyvinul nový sofistikovanejší fyzikálny model šmykovej plochy v ktorom nahradil častice kameniva kruhovými elementami (obr.2). Model bol pôvodne navrhnutý pre rozhranie s trhlinami a je obzvlášť vhodný v prípade dodatočného zaťaženia normálovou silou.



Obrázok 2: Fyzikálny model pre efekt zaklinenia kameniva v šmykovej trhline [6].

V 80. a 90. rokoch bolo vykonaných niekoľko rozsiahlych štúdií tejto problematiky. Jedným z centier výskumu je napríklad Mníchovská technická univerzita. Výskumy boli zamerané napríklad na vplyv vystuženia, zaklinenia kameniva alebo vplyv úpravy povrchu pracovnej škáry pred betonážou. Za 60 rokov výskumu je fenomén prenosu zaťaženia cez šmykové rozhranie dobre preskúmaný a výsledky z predošlých štúdií sa stali pokladom pre „Rozšírenú teóriu šmykového trenia“ [1].

3. Zložky šmykovej odolnosti

Odolnosť šmykového rozhrania sa skladá zo štyroch zložiek. Sú to: mechanické zaklinenie kameniva, adhézia, trenie a ohybová odolnosť výstuže („hmoždinkový efekt“). Ich interakcia je zložitá a to hlavne z dôvodu, že každá spomenutá zložka sa aktivuje pri inej hodnote poklzu v trhline.

3.1 Mechanické zaklinenie kameniva a adhézia

Adhézna sila je prítlačivá sila vznikajúca v dôsledku chemických a fyzikálnych väzieb v betóne. Tieto sily majú významný vplyv k celkovej šmykovej odolnosti ale sú účinné len pri poklze v trhline menšom ako 0,05mm inak dochádza k porušeniu týchto väzieb. Adhézia je špeciálne dôležitá hlavne pri hladkých, zle upravených alebo znečistených rozhraniach. Efekt zaklinenia závisí hlavne od drsnosti rozhrania, pevnosti materiálu, kvality prevedenia a finálnej úpravy pred betonážou. Príspevok adhézie a zaklinenia kameniva do celkovej odolnosti spoja je významný len pri malých

poklzoch [1]. Pri veľkých šmykových pretvoreniach sa efekt týchto účinkov významne redukuje kvôli strate príľnavosti a mikro-poškodeniam v kontaktnej oblasti.

3.2 Trenie

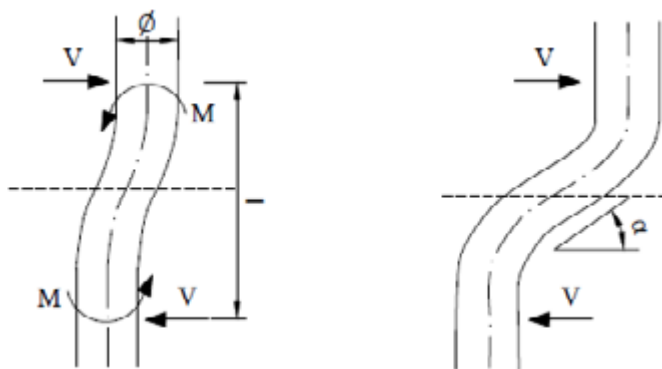
K treniu dochádza pri vzájomnom pohybe rozhraní na ktoré pôsobí tlaková sila. Veľkosť trenia závisí od koeficientu trenia, ktorý reprezentuje mikro-drsnosť rozhrania. Na základe zjednodušenej teórie šmykového trenia je šmyková odolnosť rozhrania rovná:

$$\tau = \tau_a + \mu\sigma_c \quad (1)$$

Kde τ_a je príspevok odolnosti z adhézie, σ_c je normálové napätie pôsobiace na šmykové rozhranie, μ je koeficient trenia kde (Fib Model Code 2010) odporúča použiť súčinitele trenia, pre kontakt typu nový – starý betón, 0,5 až 0,7 pre hladké povrchy, 0,7 až 1,0 pre drsné povrchy a 1,0 až 1,4 pre veľmi drsné povrchy. Normálové napätie je do prierezu vnášané vlastnou tiažou konštrukcie, ale môže byť generované aj nepriamo cez vertikálnu výstuž prechádzajúcu rozhraním pri vzniku hmoždinkového efektu [9].

3.3 Ohybová odolnosť výstuže („hmoždinkový efekt“)

Hmoždinkový efekt vzniká pri ohybovom namáhaní výstuží, ktoré prechádzajú šmykovou trhlinou. Pri poklze v trhline dôjde k vzájomnému premiestneniu horného a spodného konca výstuže. Táto deformácia vedie k vzniku ohybového namáhania, ktoré sa kombinuje s ťahovou silou vo výstuži spôsobenou roztváraním trhliny. Efekt dosiahne svoje maximum pri hodnote poklzu zodpovedajúcej 0,1 až 0,2 násobku priemeru výstuže. Pri ešte väčších poklzoch je možné pozorovať efekt skrútenia výstuže (kinking-effect) (obr.3). Tento jav umožňuje aktiváciu horizontálnej zložky ťahovej sily vo výstuži, čo výrazne zvyšuje šmykovú odolnosť. Toto správanie výstuže výrazne prispieva k celkovej šmykovej odolnosti vrubového kĺbu [1].



Obr.3: Hmoždinkový efekt a skrútenie výstuže [9].

4. Superpozícia jednotlivých zložiek odolnosti

Výsledné správanie sa vzorky je vždy výsledkom vzájomnej interakcie medzi jednotlivými zložkami šmykovej odolnosti. Pri zaťažení kĺbu šmykom, ako prvé zlyhajú adhézne väzby na šmykovom rozhraní. Následne so zväčšujúcim sa poklzom dochádza k drveniu betónu v trhline a začne prudko klesať efekt zaklinenia kameniva. Postupne dochádza k poklesu súčiniteľa trenia medzi rozhraniami.

Ohybová odolnosť výstužných prostriedkov postupne narastá so zväčšujúcim sa poklzmom v trhline. Skutočný príspevok jednotlivých zložiek k celkovej odolnosti závisí hlavne od drsnosti rozhrania, kvality väzieb a stupňa vystuženia v šmykovej trhline. Preto šmykové porušenie nastáva spravidla dvoma spôsobmi a to krehké a duktilné porušenie.

4.1 Krehké porušenie

Krehké porušenie nastáva pri málo nevystužených alebo nevystužených rozhraniach kde je stupeň vystuženia menší ako 0,05%. Porušenie nastáva spravidla pri poklze menšom ako 0,05mm. Šmykovú odolnosť zabezpečujú hlavne adhézne sily a zaklinenie kameniva a v prípade vonkajšieho tlakového zaťaženia v trhline prispieva k odolnosti aj trecia sila. Hmoždinkový efekt výstuže sa zanedbáva keďže ten sa mobilizuje až pri niekoľko násobne väčšom poklze. Vzťah (2) predstavuje zjednodušený návrhový model pre krehký typ porušenia v šmykovej trhline [1].

$$\tau_{Rd} = c_a \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n \leq 0.5 \nu f_{cd} \quad (2)$$

4.2 Duktilné porušenie

Duktilné porušenie nastáva pri rozhraniach, kde je stupeň vystuženia väčší ako 0,05%. Účinok adhézných síl sa v tomto prípade stráca keďže porušenie nastáva až pri vyšších poklzočoch pričom sa ale aktivuje hmoždinkový efekt. Vzhľadom na to je potom výsledná šmyková odolnosť rovná:

$$\tau_{Ru} = \tau_a + \mu \cdot (\sigma_n + k_1 \cdot \rho \cdot f_y) + k_2 \cdot \rho \cdot \sqrt{f_{c.cube} \cdot f_y} \quad (3)$$

Kde τ_a je šmyková odolnosť od účinkov adhézie a zaklinenia kameniva. Faktoru interakcie pričom $\kappa_1 = \sigma_s / (f_y \leq 1, 0)$, σ_n je tlakové normálové napätie pôsobiace na šmykovú plochu a σ_s je napätie vo výstuži. Súčiniteľ interakcie pre ohybovú odolnosť $\kappa_2 \leq 1, 6$ a je platný pre betóny do pevnostnej triedy C50/60 [1].

5. Záver

Za 60 rokov výskumu je fenomén prenosu zaťaženia cez šmykové rozhranie dobre preskúmaný a výsledky z predošlých štúdií sa stali pokladom pre „Rozšírenú teóriu šmykového trenia“. Na základe tejto teórie boli spracované aj návrhové odporúčania uvedené v Modelkóde 2010 [9]. Pomocou týchto odporúčaní je možné bezpečne navrhovať konštrukcie ako sú prefabrikáty a ich spoje, dodatočne dobetónované konzoly alebo pracovné škáry vzniknuté pri betonáži. Ďalšie potenciálne využitie týchto vzťahov je možné napríklad v mostnom staviteľstve pri návrhu vrubových kĺbov práve pri ktorých chýbajú posúdenia ich šmykovej odolnosti.

Literatúra

- [1] NORBERT RANDL, Design recommendations for interface shear transfer in fib Model Code 2010. *Structural Concrete 14 (2013), No. 3, str.230-241*
- [2] SCHACHT G., MARX S. Concrete Hinges – Historical development and. *3rd fib International Congress*. Washington D.C., 2010
- [3] SCHACHT G. & MARX S. Concrete hinges in bridge engineering. *ICE - Engineering History and Heritage*, 168. 64-74., 2015
- [4] BASE. (1959). Some Tests on a Particular Design of Reinforced. Slough: *Cement and Concrete Association.*, 1959.

- [5] BASE. Tests on Reinforced Concrete Hinge with a Large Design Rotation. Slough: *Cement and Concrete Association.*, 1962.
- [6] Walraven, J. C., Frenay, J. W., Pruijssers, A. F.: Influence of Concrete Strength and Load History on the Shear Friction Capacity of Concrete Members. *Journal of the Prestressed Concrete Institute (PCI)*, vol. 32, No. 1, 1987, pp. 66–84.
- [7] BE 5/75. (March 1975). Rules for the Design and Use of Freyssinet Concrete Hinges in Highway Structures. *THE HIGHWAYS AGENCY. Birmingham: The Highways Agency.*
- [8] Mattock, A. H.: Shear Transfer Under Monotonic Loading, Across an Interface Between Concretes Cast at Different Times. Structures & Mechanics Report SM76 3, *Dept. Of Civil Engineering*, University of Washington, Seattle, Sept 1976, 68pp.
- [9] 2010, M. C. (2011). Fib Model Code 2010. *Fib Special Activity Group 5.*
- [10] Mattock. (October 1981). Cyclic Shear Transfer and Type of interface. *Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*(107), 1945-1964.
- [11] Birkeland, P. W., Birkeland, H. W.: Connections in Precast Concrete Constructions. *Journal of the American Concrete Institute*, ACI, Proc., vol. 63, No. 3, 1966, pp. 345–368.

Ludmila Kormošová¹

Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 2.ročník

VPLYV OTVOROV V BLÍZKOSTI STĽPA NA BEZPEČNOSŤ MODELOV EUROKÓDU NA PREDIKCIU ŠMYKOVEJ ODOLNOSTI LOKÁLNE PODOPRETÝCH DOSIEK

INFLUENCE OF OPENINGS ADJACENT TO THE COLUMN ON SAFETY OF THE MODELS OF EUROCODE FOR ASSESSMENT OF PUNCHING SHEAR RESISTANCE OF FLAT SLABS

Abstract

The paper deals with the quality of the current EC2 model and upcoming 2nd generation of Eurocode 2 model EC2v2 for prediction of the punching capacity of slab-column connections without transverse reinforcement with two openings located close to an elongated column. The reference punching capacities were obtained from non-linear analyses carried out on the flat slab fragments with five different arrangements of the openings. The methods of calculating punching shear strengths given in the EC2 and EC2v2 are reviewed along with three different approaches of reduction of the control perimeter, and their predictions are compared with the results of the non-linear analyses. Both design models are safe in the case of predicting the punching capacity if radial projection onto control perimeters to evaluate the effect of openings is used. However, the most consistent results provided straight method based on the Augustin's proposal for reduction of the control perimeter length.

Kľúčové slová

pretlačenie, lokálne podopreté dosky, otvory, nelineárna analýza

1. Introduction

Bezprievlakové železobetónové stropné dosky patria v súčasnosti k jedným z najpoužívanějších typov konštrukcií. Napriek mnohým výhodám, má tento konštrukčný systém aj niekoľko nevýhod. Z konštrukčného hľadiska je najnebezpečnejšia koncentrácia šmykových síl v blízkosti podpier, čo môže spôsobiť pretlačenie stropnej dosky. Pretlačenie radíme ku krehkým typom porušenia. Zlyhanie nad jednou podperou môže viesť k presunu zaťaženia na susedné podpery, ktoré spôsobí ich preťaženie nasledované reťazovým zrútením celej konštrukcie. Koncentráciu šmykových napätí zvyšuje aj prítomnosť otvorov v blízkosti stĺpov alebo predĺžený stenový tvar stĺpov, kde výška stĺpa h je väčšia ako trojnásobok účinnej výšky dosky. Šmykové napätia sa vtedy sústreďujú hlavne v rohoch týchto stĺpov. Vo svete bolo uskutočnených viacero výskumov zameraných na vplyv otvorov na šmykovú odolnosť bezprievlakových dosiek. V šesťdesiatych rokoch uskutočnili výskum Moe [10] a Hognestad & Elstner [9]. V posledných rokoch výskum uskutočnili El-Salakawy [4] a Teng, Cheong & Kuang [12]. Experimentálny program prof. Tenga obsahoval 20 dosiek s otvormi bez šmykovej výstuže, pričom hrúbka dosky bola 150 mm. Dosky boli podopreté štvorcovým stĺpom a menili sa rozmery a polohy otvorov voči stĺpu. Nedávne experimentálne výskumy vykonali Borges, Melo, Gomes [3], a taktiež El-Shafiey, Hussein & Abdel-Aziz [5]. Borges odskúšal 13 lokálne podopretých dosiek s hrúbkou 200 mm, El-Shafiey 7 dosiek s hrúbkou 150 mm pričom dosky mali

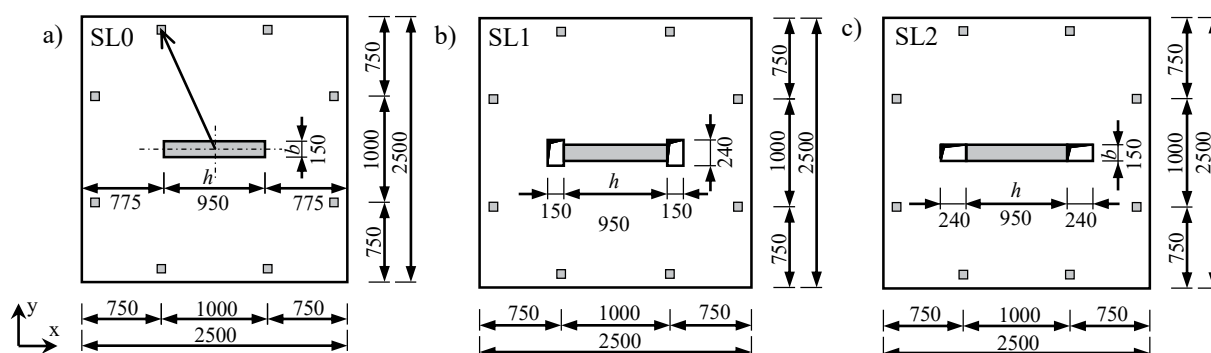
¹ Ing. Ludmila Kormošová, Stavebná fakulta, STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

štvorcové otvory rôznych rozmerov. Osem vzoriek so symetrickým usporiadaním otvorov v okolí stĺpa odskúšal Augustín a kol. [1] a [2]. Dosky mali hrúbku 250 mm, dve dosky boli referenčné bez otvorov a šesť dosiek bolo navrhnutých s otvormi pričom sa menila ich poloha voči stĺpu. Počet vyššie uvedených experimentov naznačuje, že databáza vzoriek lokálne podopretých dosiek, ktoré sú oslabené otvormi je menšia v porovnaní s databázou vzoriek dosiek bez otvorov. Preto sa nelineárna analýza stáva dôležitým nástrojom pri porovnávaní a testovaní návrhových modelov na stanovenie odolnosti proti pretlačeniu. Dôležitú úlohu však stále zohrávajú samotné experimenty, nakoľko práve tieto sa využívajú na kalibráciu nelineárnych modelov.

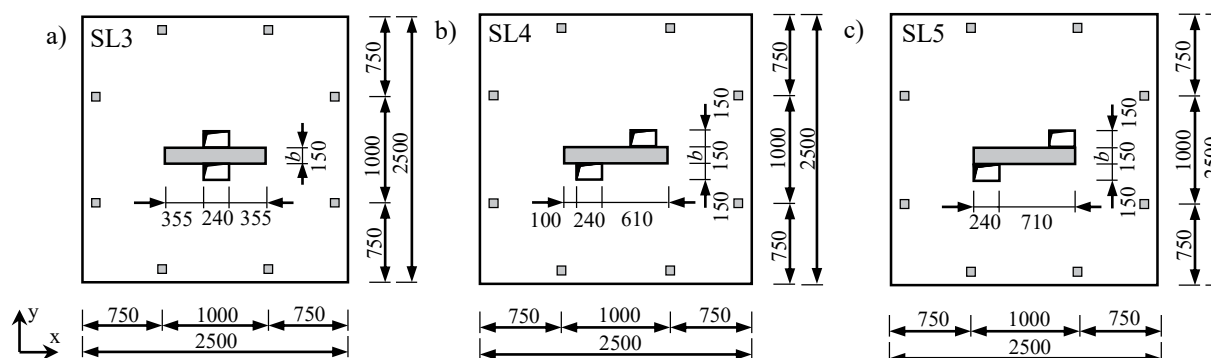
2. Nelineárna analýza

2.1 Opis vzoriek

Analýza sa realizovala na výsekoch bezprievlakových dosiek bez šmykovej výstuže s hrúbkou dosky 200 mm a účinnou výškou $=159$ mm. Všetky vzorky boli podopreté obdĺžnikovým stenovým stĺpom s rozmermi 950×150 mm, čo predstavuje pomer $h/d=6$. Pevnosť betónu v tlaku sa uvažovala hodnotou $f_{cm}=33$ MPa, betonárska výstuž mala medzu klzu $f_{ym}=580$ MPa. Stupeň vystuženia bol $\rho=1,26$ % čomu zodpovedá výstuž priemeru 16 mm vo vzdialenosti 100 mm. Maximálne zrno kameniva bolo predpokladané $d_g = 16$ mm. Na obr. 1 a obr. 2 možno vidieť vzorky ktoré boli analyzované. Obr. 1 a) predstavuje dosku bez otvorov (SL0). Ostatné dosky boli oslabené vždy dvoma otvormi s rozmermi 150×240 mm, ktoré boli umiestnené na líci obvodu stĺpa.



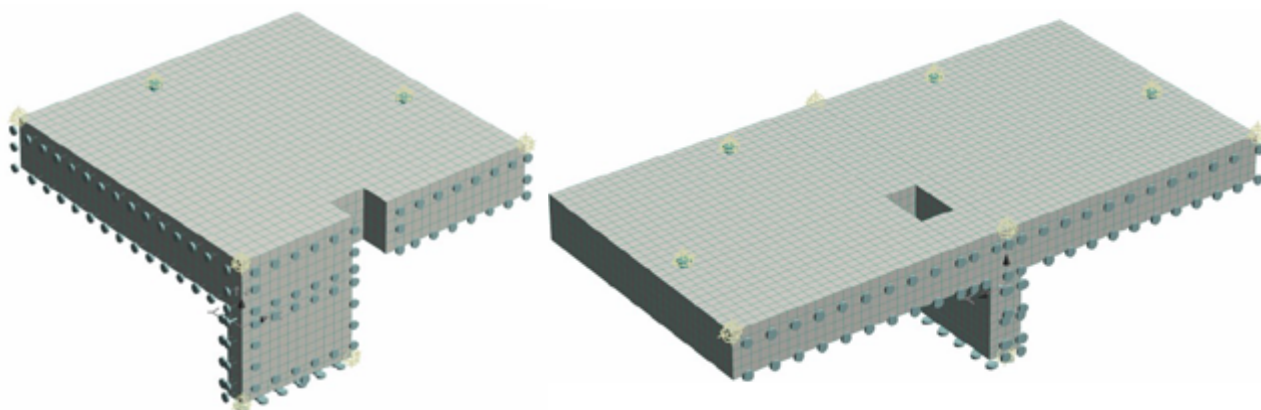
Obrázok 1: Analyzované vzorky: a) doska bez otvorov; b) otvory na rohu stĺpa, usporiadané kolmo; c) otvory na rohu stĺpa, usporiadané paralelne



Obrázok 2: Analyzované vzorky: a) otvory v strede dlhšej hrany stĺpa; b) otvory vzdialené 100 mm od rohu stĺpa; c) otvory na konci dlhšej hrany stĺpa

2.2 Modely nelineárnej analýzy

Na nelineárnu analýzu bol použitý program Atena, pričom bola modelovaná štvrtina (SL0-3) alebo polovica (SL4,5) dosky. (Obr.3) Nelineárna analýza bola vykonaná s použitím postupov, ktoré sú uvedené v [1] a priniesli dobré zhody s reálnym experimentom. Model pozostával z Brick elementov. Bol zvolený počet 5 elementov po hrúbke dosky, nakoľko ďalšie zhusťovanie siete (5-10 elementov) nemá vplyv na výsledky. Ako materiálový model pre betón bol zvolený odporúčaný model, lomovo-plastický, kde ťahaná oblasť je definovaná lomovou mechanikou a tlačaná oblasť plasticitou.



Obrázok 3: Ukážka modelu dosky z nelineárnej analýzy (program Atena),
v ľavo: model vzorky SL1, v pravo: model vzorky SL4

3. Výpočtové modely

V práci je analyzovaný výpočet šmykovej odolnosti proti pretlačeniu bezprievlakových dosiek bez šmykovej výstuže podľa súčasne platného modelu EC2 [6] a modelu EC2v2 pre pripravovanú druhú generáciu Eurokódu 2 z roku 2018 podľa podkladovej dokumentácie [7].

3.1 EC2 (2004) model

Základné princípy tohto modelu stanovil Zsutty [13], ktorý navrhol empirický prístup na základe údajov získaných z experimentálne skúšaných nosníkov. Model bol neskôr prepracovaný a publikovaný v MC 1990. MC 1990 sa stal základom pre súčasný model EC2. Šmykovú odolnosť podľa EC2 stanovujeme podľa vzťahu (1).

$$V_{Rd,c} = \frac{C_{Rk,c}}{\gamma_C} k (100 \rho f_{ck})^{1/3} u_1 d \quad (1)$$

Kde ρ je stupeň vystuženia, $\rho = (\rho_x \rho_y)^{0.5}$ s $\rho_{x(y)} = A_{sx(y)} / (d_{x(y)} b) \leq 0.02$

d účinná výška, priemer účinných výšok v dvoch, kolmých na seba, smeroch d_x a d_y

k súčiniteľ vplyvu výšky, $k = 1 + (200 \text{ [mm]} / d)^{0.5} \leq 2.0$

f_{ck} charakteristická valcová pevnosť betónu v tlaku,

γ_C parciálny súčiniteľ spoľahlivosti,

u_1 dĺžka základného kontrolného obvodu meraná vo vzdialenosti $2d$ od líca stĺpa.

3.2 EC2v2 (2018) model

Prípravovaná druhá generácia Eurokódu, ktorá je naplánovaná na rok 2020. Model bol prezentovaný v podkladových materiáloch v roku 2018 [7]. Základné princípy sú odvodené z fib MC2010 [8], ktorý je založený na teórii kritickej šmykovej trhliny (CSCT) [11].

$$V_{Rd,c} = 0.60 \frac{k_{pb}}{\gamma_c} \left(100 \rho f_{ck} \frac{d_{dg}}{\sqrt{d_v \frac{a_p}{8}}} \right)^{1/3} b_0 d_v \quad (2)$$

$$k_{pb} = \sqrt{5 \mu_p \frac{d_v}{b_0}} \quad (3)$$

Kde ρ je stupeň vystuženia, $\rho = (\rho_x \rho_y)^{0.5}$

a_p vzdialenosť od osi stĺpa po miesto nulového radiálneho momentu,

d_{dg} parameter drsnosti kritickej šmykovej trhliny, zohľadňuje triedu betónu a veľkosť kameniva

d_v účinná výška, priemer účinných výšok v dvoch, kolmých na seba, smeroch d_x a d_y ,

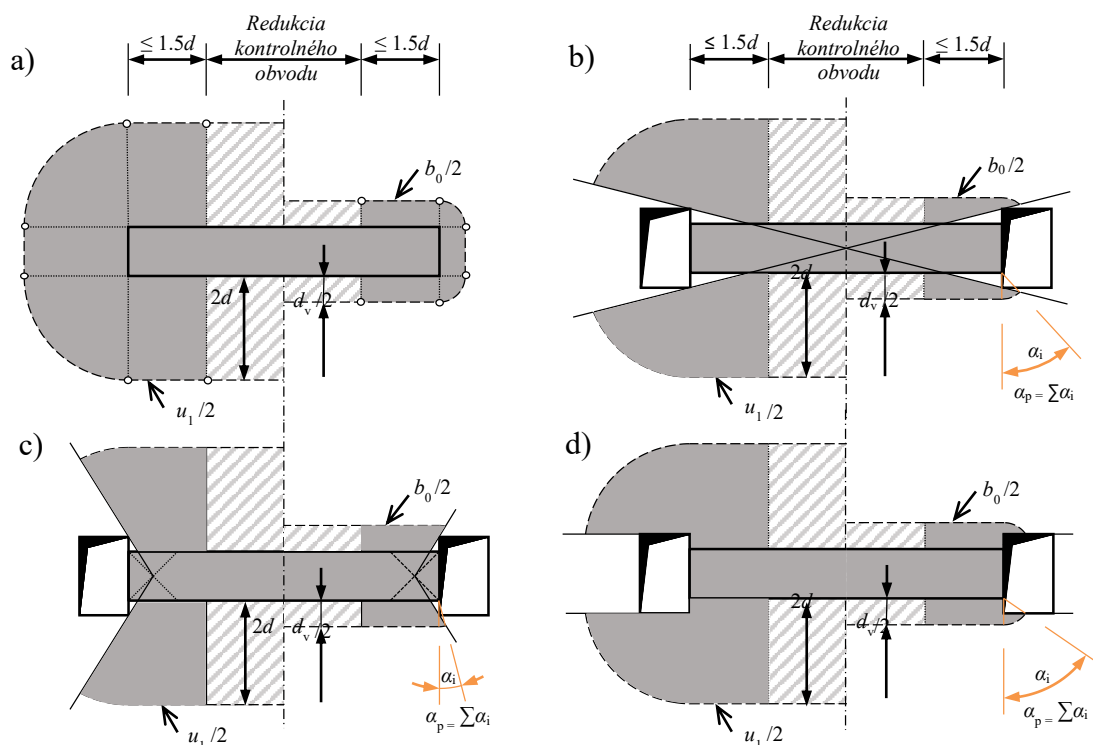
k_{pb} súčiniteľ, ktorý reprezentuje šmykový gradient

b_0 dĺžka základného kontrolného obvodu meraná vo vzdialenosti $0,5d_v$ od líca stĺpa

μ_p koeficient zohľadňujúci šmykový gradient a ohybové momenty, pre dosky s otvormi

$$\mu_p = \alpha_p / 45^\circ$$

α_p súčet uhlov zakrivených častí kontrolného obvodu. (Obr. 4)



Obrázok 4: Redukcia dĺžky základného kontrolného obvodu v dôsledku: a) podlhovastého stĺpa, b), c), d) otvorov v blízkosti podpery. Kde vľavo je zobrazená redukciu podľa EC2 a vpravo podľa EC2v2. Zároveň kde: b) súčasná metóda, radiálna, c) návrh podľa prof. Tenga, d) priama metóda, návrh podľa Augustína

Vplyv podopretia stenovým stĺpom možno zohľadniť skrátením dĺžky u_1 resp. b_0 podľa obr. 4 a). Predpokladá sa s účinnosťou len časti stĺpa do vzdialenosti $1,5d$ od okraja stĺpa. Vplyv otvorov

nachádzajúcich sa v blízkosti podpory možno zohľadniť podobne pomocou skrátenia dĺžky kontrolného obvodu. V práci boli použité tri spôsoby redukcie dĺžky základného kontrolného obvodu. Rozdiely sú znázornené na obr. 4 b) až 4 d).

4. Vyhodnotenie výsledkov

Na vyhodnotenie boli použité vzťahy uvedené v kapitole 3 pre stanovenie $V_{Rc,model}$ s uvažovaním $\gamma_c=1,0$. Za základný ukazovateľ bezpečnosti bol zvolený pomer $V_{Rc,NLA}/V_{Rc,model}$. Model môžeme považovať za bezpečný, ak pomer $V_{Rc,NLA}/V_{Rc,model}$ bude mať hodnotu $> 1,0$, pričom $V_{Rc,NLA}$ predstavuje hodnotu získanú z nelineárnej analýzy a $V_{Rc,model}$ je hodnota vypočítaná podľa jednotlivých modelov. Výsledky porovnania sú uvedené v tab. 1 a 2. V tab. 1 nebola zohľadnená redukcia dĺžky kontrolného obvodu z dôvodu predĺženého tvaru stĺpa, v tab. 2 táto redukcia už zohľadnená bola. Na obr. 5 sú vykreslené grafy, kde na zvislej osi je pomer $V_{Rc,NLA}/V_{Rc,model}$, na vodorovnej osi sú analyzované dosky s rôznym usporiadaním otvorov. Čiarkovaná čiara predstavuje hodnotu pomeru $V_{Rc,NLA}/V_{Rc,model}$ pre referenčnú dosku bez otvorov SL0. Vzorky SL0, SL1, SL2 a SL3 zlyhali pretlačením, dosky SL4 a SL5 zlyhali na ohyb.

Tabuľka 1: Výsledky hodnôt z NA $V_{Rc,NLA}$ a hodnôt šmykovej odolnosti $V_{Rc,model}$ vypočítané bez uváženia redukcie dĺžky základného kontrolného obvodu z dôvodu predĺženého tvaru stĺpa

| Nelineárna analýza | EC2 | | | | | | | EC2v2 | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|--|
| | Súčasná metóda | | | Návrh Teng | | Priama metóda | | Súčasná metóda | | | Návrh Teng | | Priama metóda | |
| | $V_{Rc,NLA}$ | $V_{Rc,model}$ | $\frac{V_{Rc,NLA}}{V_{Rc,model}}$ | $V_{Rc,model}$ | $\frac{V_{Rc,NLA}}{V_{Rc,model}}$ | $V_{Rc,model}$ | $\frac{V_{Rc,NLA}}{V_{Rc,model}}$ | $V_{Rc,model}$ | $\frac{V_{Rc,NLA}}{V_{Rc,model}}$ | $V_{Rc,model}$ | $\frac{V_{Rc,NLA}}{V_{Rc,model}}$ | $V_{Rc,model}$ | $\frac{V_{Rc,NLA}}{V_{Rc,model}}$ | |
| Slab | [kN] | [kN] | [-] | [kN] | [-] | [kN] | [-] | [kN] | [-] | [kN] | [-] | [kN] | [-] | |
| SL0 | 901 | 885 | 1.02 | 885 | 1.02 | 885 | 1.02 | 821 | 1.10 | 821 | 1.10 | 821 | 1.10 | |
| SL1 | 761 | 718 | 1.06 | 530 | 1.44 | 783 | 0.97 | 499 | 1.53 | 287 | 2.65 | 586 | 1.30 | |
| SL2 | 781 | 752 | 1.04 | 569 | 1.37 | 804 | 0.97 | 616 | 1.27 | 399 | 1.96 | 678 | 1.15 | |
| SL3 | 831 | 383 | 2.17 | 383 | 2.17 | 783 | 1.06 | 653 | 1.27 | 653 | 1.27 | 744 | 1.12 | |
| SL4 | 671 ⁽¹⁾ | 608 | 1.10 | 414 | 1.62 | 783 | 0.86 | 529 | 1.27 | 625 | 1.07 | 744 | 0.90 | |
| SL5 | 681 ⁽¹⁾ | 668 | 1.02 | 433 | 1.57 | 783 | 0.87 | 504 | 1.23 | 552 | 1.23 | 744 | 0.92 | |

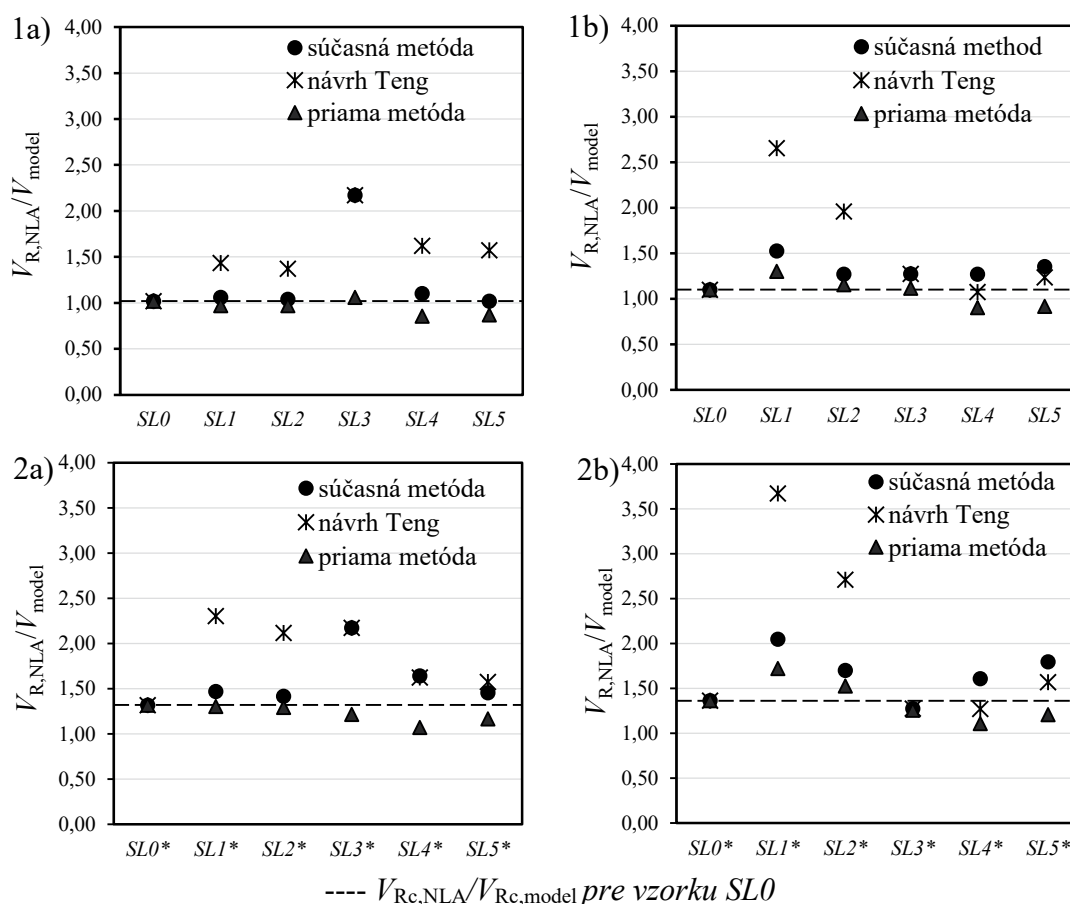
POZNÁMKA: ⁽¹⁾ – zlyhanie ohybom

Tabuľka 2: Výsledky hodnôt z NA $V_{Rc,NLA}$ a hodnôt šmykovej odolnosti $V_{Rc,model}$ vypočítané s uvážením redukcie dĺžky základného kontrolného obvodu z dôvodu predĺženého tvaru stĺpa

| Nelineárna analýza | EC2 | | | | | | | EC2v2 | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|--|
| | Súčasná metóda | | | Návrh Teng | | Priama metóda | | Súčasná metóda | | | Návrh Teng | | Priama metóda | |
| | $V_{Rc,NLA}$ | $V_{Rc,model}$ | $\frac{V_{Rc,NLA}}{V_{Rc,model}}$ | $V_{Rc,model}$ | $\frac{V_{Rc,NLA}}{V_{Rc,model}}$ | $V_{Rc,model}$ | $\frac{V_{Rc,NLA}}{V_{Rc,model}}$ | $V_{Rc,model}$ | $\frac{V_{Rc,NLA}}{V_{Rc,model}}$ | $V_{Rc,model}$ | $\frac{V_{Rc,NLA}}{V_{Rc,model}}$ | $V_{Rc,model}$ | $\frac{V_{Rc,NLA}}{V_{Rc,model}}$ | |
| Slab | [kN] | [kN] | [-] | [kN] | [-] | [kN] | [-] | [kN] | [-] | [kN] | [-] | [kN] | [-] | |
| SL0* | 901 | 685 | 1.32 | 685 | 1.32 | 685 | 1.32 | 662 | 1.36 | 662 | 1.36 | 662 | 1.36 | |
| SL1* | 761 | 519 | 1.47 | 331 | 2.30 | 584 | 1.30 | 372 | 2.04 | 207 | 3.67 | 443 | 1.72 | |
| SL2* | 781 | 552 | 1.41 | 370 | 2.11 | 605 | 1.29 | 460 | 1.70 | 288 | 2.71 | 512 | 1.52 | |
| SL3* | 831 | 383 | 2.17 | 383 | 2.17 | 685 | 1.21 | 653 | 1.24 | 653 | 1.27 | 662 | 1.26 | |
| SL4* | 671 ⁽¹⁾ | 409 | 1.64 | 409 | 1.62 | 627 | 1.07 | 418 | 1.60 | 529 | 1.27 | 607 | 1.11 | |
| SL5* | 681 ⁽¹⁾ | 469 | 1.45 | 469 | 1.57 | 585 | 1.17 | 380 | 1.79 | 434 | 1.57 | 564 | 1.21 | |

POZNÁMKA: ⁽¹⁾ – zlyhanie ohybom

Pomer $V_{Rc,NLA}/V_{Rc,model}$ pre vzorku SL0 bez otvorov, kde sa neredukovala dĺžka základného kontrolného obvodu bol 1.02 a 1.10, obr. 5(1a,1b). Pri zohľadnení redukcie základného kontrolného obvodu tento pomer vychádzal 1.32 a 1.36, obr. 5(2a,2b). Na výsledkoch dosiahnutých redukciami podľa prof. Teng vidíme veľkú nevyrovnanosť a to v oboch výpočtových modeloch. Najlepšie výsledky dosiahla táto metóda v modeli EC2v2 pri polohe otvorov na dlhšej strane stĺpa, obr.5(1b,2b). Oveľa lepšie výsledky pomerov $V_{Rc,NLA}/V_{Rc,model}$ môžeme vidieť pri redukcii kontrolného obvodu súčasnou radiálnou metódou. Ak neuvažujeme s redukciami v dôsledku výrazne obdĺžnikového stĺpa, tak sa výsledky pre EC2 pohybujú v rozmedzí 1.02 – 1.10 s výnimkou polohy otvoru v strede dlhšej strany stĺpa, kde pomer dosahuje hodnotu 2.17. V porovnaní s EC2 sú výsledky dosiahnuté podľa druhej generácie EC2v2 viac konzistentné, ale zároveň konzervatívnejšie 1.10 – 1.53. Najlepšiu zhodu s nelineárnym výpočtom dosahujú výsledky pri použití priamej redukcie podľa návrhu Augustína. Ak neuvážime skrátenie kontrolného obvodu z dôvodu tvaru stĺpa výsledky pre model EC2 sa pohybujú medzi 0.86 – 1.06 a výsledky pre EC2v2 medzi 0.90 – 1.30. Návrh redukcie dĺžky kontrolného obvodu sa v tomto prípade ukazuje nebezpečný, avšak hodnoty < 1.00 sa vyskytli u vzoriek, ktoré sa porušili predčasne ohybom.



Obrázok 5: Závislosť medzi $V_{Rc,NLA}/V_{Rc,model}$ a polohou otvorov na vzorkách, 1) bez zohľadnenia redukcie $u_1(b_0)$, 2) zohľadnenie redukcie $u_1(b_0)$; a) pre EC2, b) pre EC2v2

5. Závěry

Práca sa zaoberá spoľahlivosťou súčasného modelu EC2 a modelu EC2v2 pripravovanej druhej generácie Eurokódu 2 na výpočet odolnosti proti pretlačeniu lokálne podopretých dosiek oslabených otvormi a podopretých stenovým stĺpom. Bezpečnosť modelov sa skúmala pomocou pomeru

$V_{Re,NLA}/V_{Re,model}$ s použitím troch metód redukcie dĺžky kontrolného obvodu pre zohľadnenie prítomnosti otvorov. Na základe výsledkov parametrickej štúdie možno vyvodit' nasledujúce závery:

1. NA ukázala, že koncentrácia šmykových napätí na okrajoch stenových stĺpov neovplyvňuje významne odolnosť v pretlačení, a to ani pri stĺpoch s výškou $3.d < h < 6.d$. Toto naznačuje, že redukcia dĺžky základného kontrolného obvodu, pri stenových stĺpoch, je pomerne konzervatívna.
2. Oba modely EC2 a EC2v2 sú bezpečné vo vyšetrovaných prípadoch stanovenia odolnosti v pretlačení lokálne podpretých dosiek oslabených otvorami, ak je použitá súčasná metóda skrátenia dĺžky základného kontrolného obvodu. Avšak pre rôzne polohy otvorov v okolí stĺpa sa preukázali významné rozdiely v bezpečnosti.
3. Najlepšiu zhodu s výsledkami nelineárnej analýzy preukázala metóda, ktorá je založená na návrhu Augustína, podľa obr.4(d), naopak najväčšie odchýlky boli zaznamenané pri metóde podľa prof. Tenga, pozri obr.4(c). Táto metóda sa ukazuje ako veľmi konzervatívna.

6. Pod'akovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-15-0658 a za podpory výskumného projektu VEGA, č. VEGA 1/0254/19 „Šmyková odolnosť železobetónových dosiek namáhaných koncentrovaným zaťažením“.

Literatúra

- [1] AUGUSTIN et al. (2019) - Nonlinear FEM analysis of experimentally tested flat slabs with openings, In *Solid State Phenomena: 25th Concrete Days*, Prague, Czech Republic, November 21 - 22, 2018, Volume 292 SSP, pp. 191-196. ISSN 16629779.
- [2] AUGUSTIN T., FILLO. L, HALVONIK J. Punching Resistance of Slab-Column Connections with Openings, In *Structural Concrete: 24th*, Czech Republic. 2018. Vol. 272, pp.41-46. ISBN 978-3-909386-79-6
- [3] BORGES L. L. J., MELO G. S. and GOMES R. B. Punching shear of reinforced concrete flat plates with openings, *ACI Structural Journal*, 2013, Vol. 110, No. 4, pp. 547-556.
- [4] EL-SALAKAWY E. F., POLAK M. A., SOLIMANM M. H. Reinforced Concrete Slab-Column Edge Connections with Openings, *ACI Structural Journal*, V. 96, No. 1, Jan.-Feb. 1999, pp. 79-87.
- [5] ELSHAFIEY T. M., HUSSEIN M., ABDEL-AZIZ M. Behaviour of Flat Slabs with Openings Adjacent to Column, *Structural faults & Repair-2012 14th International Conference*, Vol. 2., 2012.
- [6] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, *Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. CEN/CENELEC, TC250, April, 2004. 118 s. ISBN 978-0-580-98289.
- [7] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *Background documents to prEN 1992-1-1 (CEN TC250/SC2)*, 2018, pp. 53-78.
- [8] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (fib). *Bulletin n. 65/66 Model Code 2010. Final draft (Vol. 1, 2. fib)*. Lausanne, 2012.
- [9] HOGNESTAD E., ELSTNER R. C., HANSON J. A., Shear Strength of Reinforced Structural Lightweight Aggregate Concrete Slabs, *ACI Journal, Proceedings V. 61, No. 6*, June, 1964, pp. 643-655.
- [10] MOE J., Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs and Footings Under Concentrate Loads, *Development Department Bulletin D47*, Portland Cement Association, Skokie, Ill., Apr., 130 pp. Rankin, G. I. B., and Long, A. E., 1987.

- [11] MUTTONI A., FERNÁNDEZ RUIZ M., Shear strength of members without transverse reinforcement as function of critical shear crack width, *ACI Structural Journal*, V. 105, No. 2, 2008, pp.163-172.
- [12] TENG S., CHEONG H. K., KUANG K. L. (2004) Punching Shear Strength of Slabs with Openings and Supported on Rectangular Columns, *ACI Structural Journal*, V. 101, No. 5, Sept.-Oct., 2004, pp. 678-687.
- [13] ZSUTTY T., Beam shear strength prediction by analysis of existing data. *ACI Journal* 65(11), 1968, pp. 943-951.

Miroslav Kováčik¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: 2

DLHODOBÉ VLASTNOSTI GFRP VÝSTUŽE POUŽITÝCH V BETÓNOVÝCH NOSNÝCH PRVKOCH

LONG-TERM BEHAVIOUR OF CONCRETE STRUCTURES REINFORCED WITH GFRP

Abstract

The lack of awareness of designers and the absence of standard procedures for design hampers extending the use of composite materials in the field of civil engineering. Nowadays, GFRP reinforcement design process of load-bearing structures is a very complicated issue, because the currently valid standards in Europe do not provide guidelines. There are many unanswered questions by using the components. It is important to know the long-term behaviour of the use of non-metallic reinforcement in concrete load-bearing structures, because higher levels of long-term stresses can cause a sudden failure of GFRP, which can lead to serious problems or collapse of a structure. The research activity at the Department of Concrete Structures and Bridges focuses on applying non-metallic reinforcement to concrete structures. The long-term experiments are currently running in the structural laboratory at the University. The experiments will provide data needed for the further development of design recommendations.

Kľúčové slová

GFRP výstuž, dlhodobé vlastnosti, nekovová výstuž, dotvarovanie, dlhodobé skúšky

1. Úvod

V posledných rokoch má použitie kompozitných materiálov s vláknom vystužených plastov FRP² vzrastajúcu tendenciu. Používanie nekovových kompozitných výstužných materiálov v betónových konštrukčných prvkoch je už niekoľko desaťročí predmetom viacerých výskumov v celom svete, vrátane Slovenska. Dá sa konštatovať, že teoretické a praktické predpoklady na ich širšie uplatnenie neboli doposiaľ vytvorené[1]. Aktuálne platné normové predpisy v Európe nepredpisujú návrh nosných konštrukcií s GRFP³ výstužou. Navrhovanie GFRP výstuže v súlade s európskymi normami je možné na základe experimentálneho vyhodnotenia skúšok podľa kapitoly 5 a prílohy D normy EN 1990. Pre zavedenie GFRP výstuže do praxe či už ako pasívnej alebo predpätej výstuže do betónových konštrukcií, je nutné poznať dokonale ich krátkodobé, ale i dlhodobé mechanické vlastnosti. Z predchádzajúcich výskumov je známe, že hodnota dlhodobého napätia vo výstuži a dĺžka pôsobenia zaťaženia majú zásadný vplyv na dlhodobú pevnosť FRP výstuže. Experimenty na overenie odolnosti proti porušeniu dotvarovania sa doteraz realizovali a vyhodnocovali na základe krátkodobých skúšok. Výsledky z týchto krátkodobých experimentov sa lineárne extrapolovali na dlhší čas. Je dôležité poznať správanie sa FRP výstuže pri dlhodobých

¹ Miroslav Kováčik, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra betónových konštrukcií a mostov Radlinského 11, blok A, 4. posch., 810 05 Bratislava 15

² FRP – Fiber Reinforced Plastics

³ GRFP - Glass Fiber Reinforced Polymer

účinkoch zaťaženia, keďže konštrukcie, v ktorých sa použila, nedosahujú ešte zďaleka svoju predpokladanú životnosť.

2. Materiálovo-fyzikálne charakteristiky GFRP

Niektoré vlastnosti GFRP výstuže ponúkajú mnohé výhody proti ocelevej výstuži. GFRP kompozity sa dajú vo všeobecnosti popísať ako materiál, ktorý sa skladá z dvoch zložiek – nosná zložka vyskytujúca sa vo forme jednosmerne orientovaných vlákien a spojivo tvorené živicom. Výsledné vlastnosti kompozitu sú definované predovšetkým typom a vzájomným pomerom oboch zložiek. Najdôležitejšia z fyzikálno-mechanických vlastností je pevnosť v ťahu v smere nosných vlákien a modul pružnosti v ťahu. Dá sa konštatovať, že materiálové charakteristiky GFRP výstuže majú rozdielne hodnoty v smere orientácie nosných vlákien a kolmo na smer vlákien, ktoré sú výrazne horšie [2].

Maximálne objemové percentuálne zastúpenie vlákien valcovitého tvaru môže byť v kompozite až 91 %, obvykle sa zhoršujú výsledné vlastnosti po prekročení 80 % obsahu vlákien. V bežne komerčne vyrábaných kompozitných materiáloch sa pohybuje objemový podiel vlákien v rozmedzí 50 až 70 % [1].

Vlákná majú vysokú pevnosť pri relatívne nízkej hmotnosti (sklenené vlákna $2600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Pracovný diagram má vždy lineárny priebeh až do porušenia. Ďalšou dôležitou vlastnosťou GFRP výstuže je, že má vysokú odolnosť voči vplyvom prostredia, ktoré spôsobujú koróziu bežne používanej ocelevej predpätej a nepredpätej výstuže.



Obrázok 1: GFRP výstuž do betónových prvkov, prevzaté z [2].

3. Dlhodobé vlastnosti GFRP

Vláknom vystužené polyméry sa významne líšia svojimi vlastnosťami oproti klasickej ocelevej výstuži. Faktom je, že GFRP výstuže môžu zlyhať aj pri hladinách zaťažení nižších ako je ich dlhodobá pevnosť. Tento jav sa v odbornej literatúre nazýva „creep rupture“. Ide o náhle zlyhanie GFRP výstuže, ktorá je vystavená pôsobeniu dlhodobého zaťaženia.

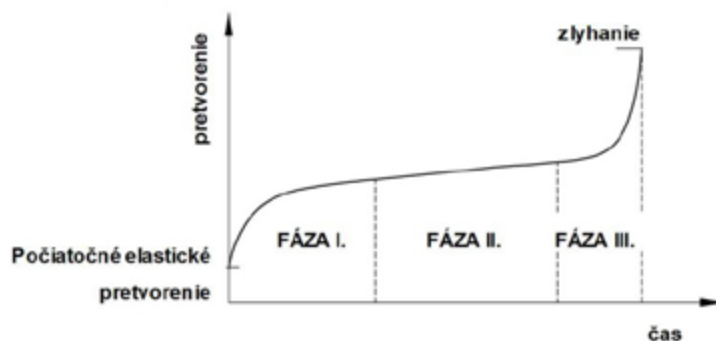
Je potrebné sledovať pretvorenia a dlhodobú ťahovú pevnosť GFRP výstuže, aby pre definovanú hladinu zaťaženia bolo zaistené, že nedôjde ku náhlemu porušeniu alebo roztrhnutiu výstužných prútov pred dosiahnutím plánovanej životnosti konštrukcie. GFRP výstuže vystavené dlhodobému pôsobeniu zaťaženia vykazujú nárast deformácie v čase, pričom dochádza k dotvarovaniu výstuže.

3.1 Dotvarovanie GFRP

Priebeh dotvarovania v čase je u kompozitných výstuží možné rozdeliť do troch častí (viď obr.2). Prvá časť nastáva okamžite po vnesení zaťaženia. Prvok má teda okamžitú elastickú deformáciu. Po relatívne krátkom časovom úseku dôjde ku deformácii s klesajúcou intenzitou. Ide o podobný priebeh ako pri dotvarovaní betónu. Tento jav je možné vysvetliť postupným prerozdelením vneseného zaťaženia z celého kompozitu na jednotlivé vlákna. Redistribúcia napätia zo živice do vlákien je pre nízke hladiny pretvorenia vratná. To znamená, že po odľahčení vzoriek dôjde ku postupnému vymiznutiu pretvorenia spôsobeného dotvarovaním kompozitu.

Druhá časť dotvarovania je charakteristická miernym nárastom pretvorenia počas dlhého časového úseku. V tejto oblasti by sa mala nachádzať správne navrhnutá GFRP výstuž po celú dobu životnosti konštrukcie. Ak je hladina namáhania dostatočne nízka, poškodenie vlákien sa týka iba druhej časti dotvarovania a výstuž má kvázi neobmedzenú životnosť.

V tretej časti nastane prudký nárast deformácie v dôsledku dotvarovania výstuže, čo vyústi do narastajúceho porušenia vlákien a nečakaného krehkého zlyhania kompozitu[2].



Obrázok 2: priebeh dotvarovania výstuže, prevzaté z [2].

3.2 Obmedzenie hladiny namáhania GFRP výstuže

Z týchto príčin je nutné zdefinovať hodnoty dlhodobo pôsobiaceho zaťaženia, aby nedošlo k náhlemu roztrhnutiu výstuže a kolapsu konštrukcie počas plánovanej životnosti konštrukcie. Predpisy značne obmedzujú hladinu dlhodobého prevádzkového napätia vo výstuži a môže byť obmedzená až na štvrtinu jej krátkodobej pevnosti, aby sa predišlo zlyhaniu konštrukcie z dôsledku pôsobenia dlhodobého zaťaženia [2].

V súčasnosti neexistujú informácie týkajúce sa dlhodobého správania sa FRP výstuže, pretože konštrukcie, v ktorých sa použila, nedosahujú ešte zďaleka svoju predpokladanú životnosť.

Podľa literatúry [5] je pre nepredpäté prvky napätie obmedzené z dôsledku dotvarovania. Predpis udáva maximálne prípustné napätie ako násobok jeho medznej pevnosti (f_{FRPu})¹. Pre CFRP² to je 0,65, pre AFRP³ 0,35 a pre GFRP len 0,25 násobok pevnosti. Pre prvky s predpätou výstužou je uvádzané v čase vnesenia predpätia do prvku a v mieste kotvenia zhrnuté v nasledujúcej tabuľke:

Tabuľka 1: Maximálne prípustné napätia vo výstuži v mieste kotvenia (kotvy) a v mieste vnesenia predpätia [5].

| | V mieste kotvenia | V mieste vnesenia predpätia |
|------|-------------------|-----------------------------|
| CFRP | 0,70 f_{FRPu} | 0,65 f_{FRPu} |
| AFRP | 0,40 f_{FRPu} | 0,35 f_{FRPu} |
| GFRP | 0,30 f_{FRPu} | 0,25 f_{FRPu} |

Podľa literatúry [6] je predpísané maximálne dovolené namáhanie pri medzných stavoch použiteľnosti prútov GFRP výstuže v ťahu ako 25% z hodnoty ťahovej pevnosti.

Ďalej podľa literatúry [7] je napätie z pohľadu dotvarovania výstuže obmedzené ako násobok garantovanej pevnosti v ťahu. Pre CFRP je to 0,55 f_{tu} , pre AFRP 0,30 f_{tu} a pre GFRP 0,30 f_{tu} .

Vlastností FRP kompozitov ovplyvňujú vo výraznej miere vplyvy prostredia, ktorým sú materiály dlhodobo vystavené. Na základe predchádzajúcich štúdií sa v niektorých krajinách zaviedli redukčné súčinitele na obmedzenie hodnôt mechanických vlastností FRP.

¹ f_{FRPu} - pevnosť FRP v ťahu

² CFRP - Carbon Fiber Reinforced Polymer

³ AFRP - Aramid Fiber Reinforced Polymer

Z predchádzajúcich výskumov je známe, že hodnota dlhodobého napätia vo výstuži a dĺžka pôsobenia zaťaženia majú zásadný vplyv na dlhodobú pevnosť FRP výstuže.

Experimenty na overenie odolnosti proti porušeniu dotvarovania sa doteraz realizovali a vyhodnocovali na základe krátkodobých skúšok. Výsledky z týchto krátkodobých experimentov sa lineárne extrapolovali na dlhší čas. Je dôležité poznať správanie sa FRP výstuže pri dlhodobých účinkoch zaťaženia.

4. Dlhodobé skúšky predpätých dosiek z GFRP

Pre účely experimentu boli zhotovené a zahájené tzv. dlhodobé skúšky šiestich vopred predpätých dosiek vystužených GFRP výstužou. Výrobu dosiek, a experiment zostavil a publikoval vo svojej dizertačnej práci Ing. Adrián Valašík PhD.



Obrázok 4: priebeh dlhodobých skúšok

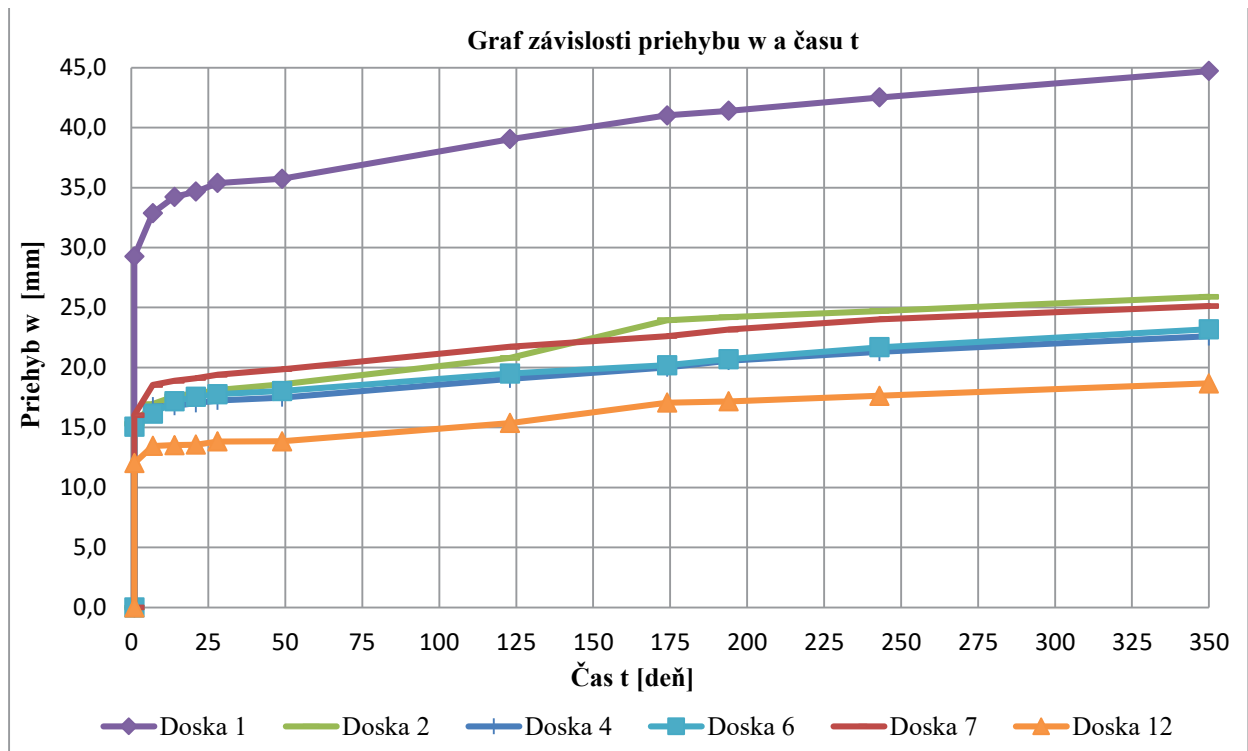
V príspevku sú uvedené výsledky doterajších meraní nárastu priehybu dosiek. Dlhodobé sledovanie zmeny priehybu bolo zahájené dňa 06.09.2018. Intenzita meraní bola zvolená tak, aby nárast priehybu medzi jednotlivými časovými úsekmi bol merateľný. Avšak tieto skúšky naďalej prebiehajú a je potrebné pokračovať v meraní a následnom vyhodnotení skúšok. Je možné, že dôjde k náhlemu porušeniu výstuže takzvaným javom „creep rupture“. Autor dlhodobých skúšok uviedol, že tento typ porušenia môžeme očakávať na doske č.1.



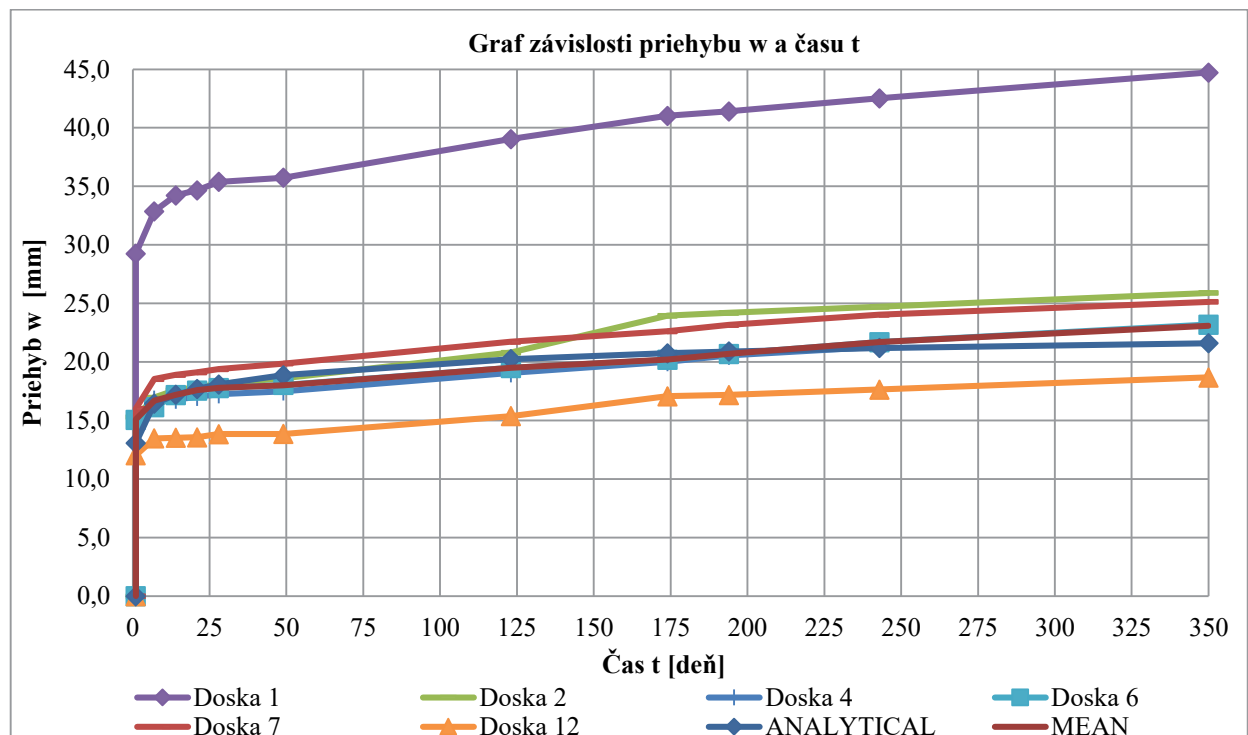
Obrázok 3: rozvoj trhlin v strede rozpätia dosky a nárast priehybu na doske č.1

Pre potreby získania experimentálnych údajov bola navrhnutá zaťažovacia zostava. Zaťaženie dosiek bolo zrealizované pomocou vriec s pieskom. Na každú dosku bolo použitých 12 ks vriec s pieskom, každé s hmotnosťou 25 kg. Každé vreco bolo odvážené. V príspevku sú zhrnuté výsledky doterajších meraní nárastu priehybu dosiek v nasledujúcich grafoch.

Zmena priehybu dosiek môže byť zapríčinená poklesom napätia vo výstuži a reologickými javmi betónu. Účinok dotvarovania betónu je zohľadnený zavedením efektívneho modulu pružnosti. Hodnoty súčiniteľa dotvarovania boli vypočítané v súlade s aktuálne platnou normou STN EN 1992-1-1. Vypočítané hodnoty priehybov v jednotlivých časových úsekoch boli porovnané s doterajšími experimentálne nameranými priehybmi. Z porovnania vyplýva, že nárast priehybu na predpätých doskách môžeme prevažne prisúdiť dotvarovaniu betónu. Pokles napätia vo výstuži ako aj úbytok prierezovej plochy výstuže nie je zatiaľ možné po takto krátkom časovom úseku s istotou potvrdiť.



Obrázok 4: závislosť priehybu a času



Obrázok 5: Graf porovnania predbežných experimentálnych výsledkov s teoretickým

5. Záver

Pre zavedenie GFRP výstuže do praxe či už ako pasívnej alebo predpätej výstuže do betónových konštrukcií, je nutné poznať dokonale ich krátkodobé, ale i dlhodobé mechanické vlastnosti. Pre efektívne využitie týchto výstuží je vhodné predpätie GFRP výstuže, kvôli ich veľkej deformačnej

kapacite t.j. nízkemu modulu pružnosti. Ďalšou výhodou predopnutia GFRP výstuže oproti použitiu výstuže ako pasívnej, je zaistenie polohy výstuže v betónových nosných prvkoch.

Z predchádzajúcich výskumov je známe, že hodnota dlhodobého napätia vo výstuži a dĺžka pôsobenia zaťaženia majú zásadný vplyv na dlhodobú pevnosť FRP výstuže. Experimenty na overenie odolnosti proti porušeniu dotvarovania sa doteraz realizovali a vyhodnocovali na základe krátkodobých skúšok. Výsledky z týchto krátkodobých experimentov sa lineárne extrapolovali na dlhší čas. Je dôležité poznať správanie sa FRP výstuže pri dlhodobých účinkoch zaťaženia, keďže konštrukcie, v ktorých sa použila, nedosahujú ešte zďaleka svoju predpokladanú životnosť. Pre účely stanovenia redukčných súčiniteľov pre obmedzenie hladiny namáhání boli zahájené dlhodobé skúšky v reálnom čase na Stavebnej fakulte STU.

6. PodĎakovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-15-0658.

Literatúra

[1] B. ŠPERNOGA a Ľ. NAĎ, „Vplyv dlhodobo pôsobiaceho statického namáhania na pretvorenie betónových nosníkov s nekovovou kompozitnou výstužou GFRP,“ *In: Betón na Slovensku 2002-2006. Zborník prednášok z konferencie fib pri príležitosti 2. fib kongresu - Neapol*, jún 2006.

[2] BENKO, V., BILČÍK, J., a kolektív.: Manuálu na navrhovanie GFRP výstuže do betónových konštrukcií. In *Manuál na navrhovanie GFRP výstuže do betónových konštrukcií*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská komora stavebných inžinierov, 2015, ISBN 978-80-8076-117-2.

[3] fib Bulletin no. 40, „FRP reinforcement in RC structures“, *International federation for structural concrete, 2007, Lausanne, Switzerland*, ISBN 978-3-433-03061-5.

[4] CAN/CSA-S6-06, Canadian Highway Bridge Design Code, May 2010.

[5] ZAWAM, HM.: Long-Term Behaviour of GFRP, Prestressed Concrete Beams. *Waterloo, Ontario, Canada, 2015*

[6] CAN/CSA-S806-12

[7] ACI 440.1R-15, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI Committee 440, March 2015.

[8] VALAŠÍK, Adrián. Teoretická a experimentálna analýza betónových dosiek vystužených GFRP výstužou. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 28th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 24th 2018, Bratislava*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2018, CD-ROM, s. 310-315. ISBN 978-80-227-4864-3.

Eliška Kučová¹

ODVODENIE RELATÍVNEJ UĽAHNUTOSTI HRUBOZRNÝCH ZEMÍN Z VÝSLEDKOV DYNAMICKEJ PENETRAČNEJ SKÚŠKY

DETERMINATION OF THE RELATIVE DENSITY OF COARSE-GRAINED SOILS FROM THE RESULTS OF THE DYNAMIC PENETRATION TEST

Abstract

Dynamic penetration is a field test that can be used in geological engineering for testing of soil resistance and determination of some geotechnical parameters of the soil. For this purpose, it is necessary to know the correlations between results of dynamic penetration and soil geotechnical parameters. Geotechnical parameters for coarse grained soils that can be derived from the results of this test are: relative density I_D , deformation modulus E_{def} or friction angle φ . First part of this article analyzes published correlations for relative density I_D . Next part of the article shows an example of test results evaluation and applicability of correlations with relative density from the laboratory experiment, where the relative density of sandy gravel was tested by medium dynamic penetration probe.

Kľúčové slová

Dynamická penetračná skúška, hrubozrnné zeminy, relatívna uľahnutosť

1. Úvod

Dynamická penetračná skúška (DPT) je typ terénnej skúšky, ktorá sa využíva na skúšanie odporu zemín. Nástroj používaný počas skúšky sa volá dynamická penetračná sonda alebo dynamický penetrometer. Významný vývoj týchto penetrometrov sa datuje do 20. storočia, kedy prešli viacerými úpravami, vylepšeniami a normovaním. Viacerými odborníkmi boli odvodené korelácie medzi výsledkami určitého typu dynamickej penetrácie a vlastnosťami zemín. Avšak, uplatniteľnosť týchto korelácií pre iné typy penetračných prístrojov je stále nejasná. Pomocou korelácií uvedených v odbornej literatúre je možné pre hrubozrnné zeminy stanoviť nasledovné parametre: relatívnu uľahnutosť I_D , deformačný modul E_{def} a uhol šmykovej pevnosti φ . Tieto parametre priamo vstupujú a ovplyvňujú návrh geotechnických konštrukcií. Článok je zameraný na analýzu korelácií dynamickej penetrácie a relatívnej uľahnutosti I_D pre hrubozrnné zeminy.

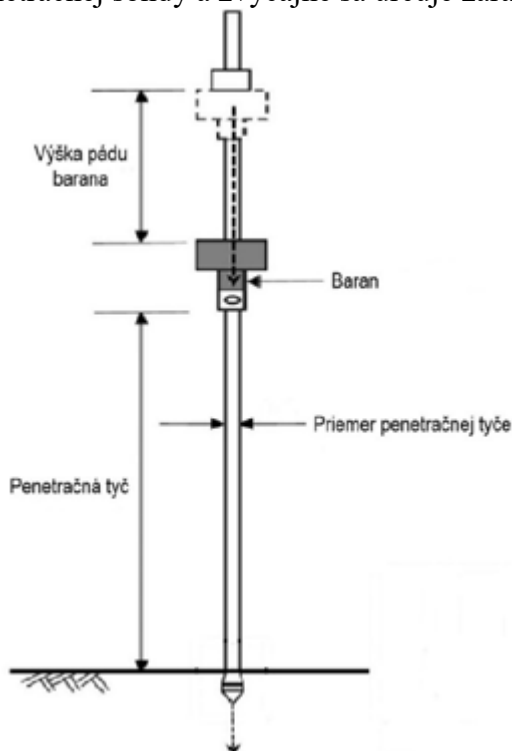
2. Dynamická penetračná skúška

Dynamická penetračná sonda pozostáva z tyče alebo sústavy tyčí (obr. 1). Na vrchnú časť tyče je pripevnená kovadlina a baran s určitou váhou. Baran z konštantnej výšky dopadá na kovadlinu, čím vytvára dynamickú silu, ktorou je spodná tyč zarážaná do zeminy. Spodná časť penetračnej tyče je zakončená kužeľovým hrotom, ktorý môže mať v závislosti od typu sondy rôzny priemer a sklon vrcholového uhla. Z hľadiska použiteľnosti existujú dva typy kužeľových hrotov – pevný hrot a stratený hrot (obr. 2). Pevný hrot je súčasťou penetračnej tyče a jeho priemer je rovnaký ako priemer tyče. Stratený hrot sa pred skúškou nasadí na penetračnú tyč, jeho priemer je väčší ako priemer tyče a po ukončení skúšky zostáva v zemine.

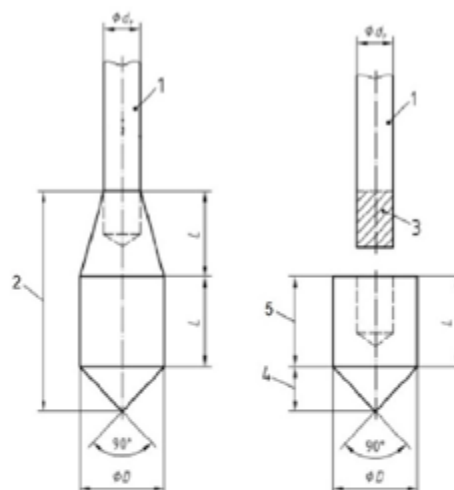
¹Ing. Eliška Kučová, Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, e-mail: eliska.kucova@stuba.sk

V závislosti od váhy barana sú v Eurokóde 7-2 [3] uvedené nasledujúce kategórie skúšok: ľahká dynamická skúška (DPL), stredne ťažká dynamická skúška (DPM), ťažká dynamická penetračná skúška (DPH), extrémne ťažká penetračná skúška (DPSH).

Podstatou dynamickej penetračnej skúšky je meranie penetračného odporu, ktorý predstavuje odpor zeminy voči vnikaniu sútyčia. Dynamický penetračný odpor q_{dyn} je definovaný ako počet úderov (N) potrebných na zarazenie sútyčia do zeminy o danú hĺbku. Hĺbka vniku závisí od typu penetračnej sondy a zvyčajne sa určuje zarazenie o 10 cm (N_{10}) alebo zarazenie o 20 cm (N_{20}).



Obrázok 1: Schéma dynamickej penetračnej súpravy



Kľúč

- 1 tyč
- 2 kužeľový hrot
- 3 napojenie hrotu na tyč
- 4 špička kužeľového hrotu
- 5 plášť hrotu

Obrázok 2: Typy penetračných hrotov

3. Korelácie medzi výsledkami DPT a relatívnou uľahnutosťou I_D

Relatívnu uľahnutosť I_D možno stanoviť z výsledkov dynamickej penetračnej skúšky dvoma spôsobmi. Prvým spôsobom stanovenia I_D je výpočet pomocou empirických vzorcov na základe q_{dyn} a N_{10} , v ktorých sa zohľadňuje zloženie zeminy, hladina podzemnej vody a aj typ penetračnej sondy. Druhým spôsobom určenia I_D je odčítanie jeho hodnoty z tabuliek, zostavených pre q_{dyn} aj N_{10} , kde je možné okrem zloženia zeminy posúdiť napríklad aj jej genézu.

3.1. Relatívna uľahnutosť I_D stanovená z empirických vzťahov

Nižšie uvedené empirické vzťahy opisujú výpočet relatívnej uľahnutosti I_D na základe dynamického penetračného odporu q_{dyn} . Prvý vzťah, ktorý uvádza Švasta [4], zohľadňuje zloženie zemín prostredníctvom bezrozmerných parametrov a , b . Švastov empirický vzťah je vyjadrený rovnicou (1). Hodnoty bezrozmerných parametrov a , b v rovnici (1) odvodené pre jednotlivé typy hrubozrnných zemín sú uvedené v tabuľke 1.

$$I_D = a * (q_d)^b \quad (1)$$

Tabuľka 1: Hodnoty bezrozmerných parametrov a , b v rovnici (1)

| Typ zeminy | | Koeficient a | Koeficient b |
|-------------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|
| Piesok | prachovitý ílovitý | 0,16 | 0,7 |
| | jemný | 0,15 | 0,67 |
| | strednozrnný, hrubozrnný | 0,14 | 0,63 |
| Štrkovité zeminy, štrkopiesky | | 0,13 | 0,6 |

Druhý empirický vzťah pre I_D (rovnica 2) je uvedený v EN 1997-2 [2] a je odvodený priamo z počtu úderov N_{10} . Ako možno vidieť v tabuľke 2, v tomto vzťahu je okrem typu zeminy zohľadnená aj hladina podzemnej vody a typ penetračnej sondy, od ktorých sa následne odvíjajú parametre a_1 a a_2 .

$$I_D = a_1 + a_2 * \log N \quad (2)$$

Tabuľka 2: Hodnoty bezrozmerných parametrov a_1 , a_2 v rovnici 2

| Typ skúšky | Piesky nad HPV s $Cu \leq 3$ | | Piesky pod HPV s $Cu \leq 3$ | | Piesky, štrky nad HPV s $Cu \leq 3$ | |
|------------|------------------------------|-------|------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|
| | a_1 | a_2 | a_1 | a_2 | a_1 | a_2 |
| DPL | 0,15 | 0,26 | 0,21 | 0,23 | | |
| DPH | 0,10 | 0,435 | 0,23 | 0,38 | -0,14 | 0,55 |

3.2. Relatívna uľahnutosť I_D stanovená z tabuľkových hodnôt

I_D je možné stanoviť v závislosti od dynamického penetračného odporu alebo počtu úderov N_{10} pomocou hodnôt, uvedených v tabuľkách 3, 4, 5 a 6. Tieto tabuľky zohľadňujú okrem typu zeminy aj jej genézu.

3.2.1. I_D stanovená v závislosti od dynamického penetračného odporu q_{dyn}

V nasledujúcich tabuľkách sú uvedené príklady odvodenia I_D z výsledkov dynamického penetračného odporu q_{dyn} . Tabuľka 3 sumarizuje závislosti medzi dynamickým penetračným odporom a relatívnou uľahnutosťou pre piesky a štrky publikovaných viacerými autormi.

Tabuľka 3: Relatívna uľahnutosť I_D hrubozrnných zemín

| Relatívna uľahnutosť I_D | | Rozsah platnosti | | |
|----------------------------|-------------|-------------------------|---|----------------------------|
| | | Piesky (STN 72 1032) | Štrk, piesčitý štrk, piesok (S.A. Šaškov) | Štrk zle zrnený (Obert) |
| <i>kypré</i> | < 0,33 | $q_d (< 2,8)$ | $q_d (< 5,0)$ | $q_d (< 4,0)$ |
| <i>stredne uľahnuté</i> | 0,33 – 0,66 | $q_d (2,8 – 11,0)$ | $q_d (5,0 – 10,0)$ | $q_d (4,0 – 14,0)$ |
| <i>uľahnuté</i> | > 0,66 | $q_d (> 11,0)$ | $q_d (> 10,0)$ | $q_d (> 14,0)$ |

Podľa genézy zemín uvádza Obert [1] v tabuľke 4 relatívnu uľahnutosť pre eolické piesky a norma STN 72 1032 [6] uvádza v tabuľke 5 relatívnu uľahnutosť pre aluviálne štrky. V oboch prípadoch je I_D odvodzovaná z dynamického penetračného odporu.

Tabuľka 4: Uľahnutosť eolických pieskov (Obert v Matys et al. 1990)

| Uľahnutosť eluviálnych pieskov | q_{dyn} (MPa) |
|--------------------------------|-----------------|
| Kyprý | < 11,2 |
| Stredne uľahnuté | 11,2 až 23,0 |
| Uľahnuté | > 23,0 |

Tabuľka 5: Uľahnutosť aluviálnych štrkov (v súlade s STN 72 1032)

| Uľahnutosť I_D | q_{dyn} (MPa) |
|------------------|-----------------|
| Kyprý | < 6,0 |
| Stredne uľahnuté | 6,0 až 11,0 |
| Uľahnuté | > 11,0 |

3.2.2. I_D stanovená v závislosti od počtu úderov N_{10}

Tabuľka 6 opisuje relatívnu uľahnutosť hrubozrnných zemín odvodenú z počtu úderov N_{10} . V uvedenej tabuľke je opísaná všeobecná klasifikácia relatívnej uľahnutosti pre hrubozrnné zeminy, ktorú uvádza Obert [5].

Tabuľka 6: Relatívna uľahnutosť hrubozrnných zemín

| Relatívna uľahnutosť I_D | Typ zeminy a rozsah platnosti pre N_{10} | |
|----------------------------|--|----------------------|
| | Piesky | Štrky |
| kypré | $N_{10} \leq 3,0$ | $N_{10} \leq 4,0$ |
| stredne uľahnuté | $3 \leq N_{10} < 15$ | $4 \leq N_{10} < 15$ |
| uľahnuté | $N_{10} \geq 15$ | |

4. Príklad vyhodnotenia dynamickej penetračnej skúšky

Na účel ukážky odvodenia relatívnej uľahnutosti hrubozrnných zemín z dynamickej penetrácie bola použitá kontrola zhutnenia zeminy pre výskumnú úlohu, riešenú na Stavebnej fakulte. Táto úloha rieši problematiku experimentálneho skúšania pre integrované mosty a je riešená na katedre betónových konštrukcií. V rámci experimentu bolo vybudované debnenie o rozmeroch 0,9 m x 8,0 m x 1,8 m, ktoré bolo naplnené štrkom. Vlastnosti štrku sa skúšali vykonaním dynamickej penetračnej skúšky katedrou Geotechniky v niekoľkých etapách. Na skúšanie bola použitá stredne ťažká dynamická penetračná sonda s parametrami:

- | | | | |
|---------------------------|--------------------|-----------------------|----------|
| - Priemer hrotu | 43,7 mm | - Dĺžka tyče | 1 m |
| - Vrcholový uhol hrotu | 90 ° | - Váha barana | 0,3 kN |
| - Prierezová plocha hrotu | 15 cm ² | - Výška pádu barana | 50 cm |
| - Priemer tyče | 32 mm | - Počet úderov barana | 30 / min |

Použitím dynamickej sondy sa uskutočnili 2 skúšky v štrku na dvoch rôznych miestach (obr. 3). Sonda bola zarazená približne do hĺbky 1,8 m (výška debnenia).

4.1. Výsledky skúšky a ich interpretácia

Počas dynamickej penetrácie bol odčítavaný počet úderov N_{10} (tabuľka 7). Následne bol počet úderov N_{10} prepočítaný na dynamický penetračný odpor q_{dyn} použitím *holandského vzorca* (rovnica 3) [5]. Hodnoty q_{dyn} sú uvedené v tabuľke 8. Tieto hodnoty boli použité v rovnicach (1) a (2) na výpočet relatívnej uľahnutosti štrkov. Porovnaním hodnôt I_D s hodnotami v tabuľkách 3 a 5 možno definovať túto zeminu ako kyprú ($q_{dyn} < 5,0$).

$$q_{dyn} = \frac{M^2 * H * N}{A * e * (M + P)} \quad (3)$$

kde q_{dyn} je dynamický penetračný odpor (MPa);
M tiaž barana (kN);
H výška pádu barana (m);
P tiaž penetračnej sondy (kN), /hrot, sútyčie, kovadlina/;
A prierezová plocha hrotu (m²);
N počet úderov na vnik hrotu e ;
 e vnik hrotu o 0,10 alebo 0,20 m.

Tabuľka 7.: Počet úderov N_{10} pre dve skúšky (sonda 1, sonda 2)

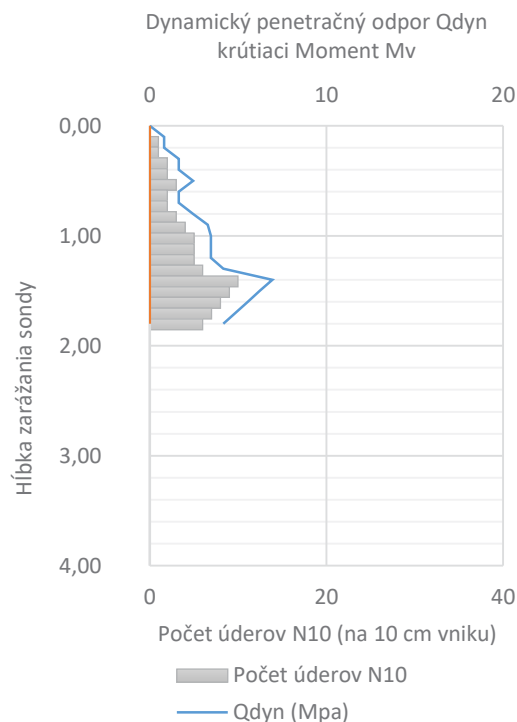
| Hĺbka zarazenia hrotu (m) | Sonda 1 | Sonda 2 |
|---|-----------------------|-----------------------|
| | Počet úderov N_{10} | Počet úderov N_{10} |
| 0 | 0 | 0 |
| 0,1 | 1 | 2 |
| 0,2 | 1 | 3 |
| 0,3 | 2 | 4 |
| 0,4 | 2 | 5 |
| 0,5 | 3 | 5 |
| 0,6 | 2 | 6 |
| 0,7 | 2 | 6 |
| 0,8 | 3 | 7 |
| 0,9 | 4 | 8 |
| 1 | 5 | 7 |
| 1,1 | 5 | 7 |
| 1,2 | 5 | 7 |
| 1,3 | 6 | 6 |
| 1,4 | 10 | 5 |
| 1,5 | 9 | 5 |
| 1,6 | 8 | 4 |
| 1,7 | 7 | 5 |
| 1,8 | 6 | 6 |
| Priemerný počet úderov N_{10} | 4,3 | 5,2 |

Na základe priemerného počtu úderov N_{10} z tabuľky 7 a porovnaním tejto hodnoty s tabuľkou 6 možno zhodnotiť, že daná zemina je stredne uľahnutá. Z podrobnejšej analýzy výsledkov vyplýva, že zhutnenie v debnení nie je rovnomerné. Z výsledkov v tabuľke 7 pre sondu 1 možno vyčítať, že zhruba do 0,9 m bola zemina kyprá a pod ňou sa nachádza zemina stredne uľahnutá. Skúška 2 (Sonda 2) poukazuje na to, že približne vrchných 30 cm zeminy je kyprých a zvyšná časť zeminy je stredne uľahnutá. Z uvedeného vyplýva, že zemina ďalej od experimentu je viac zhutnená.

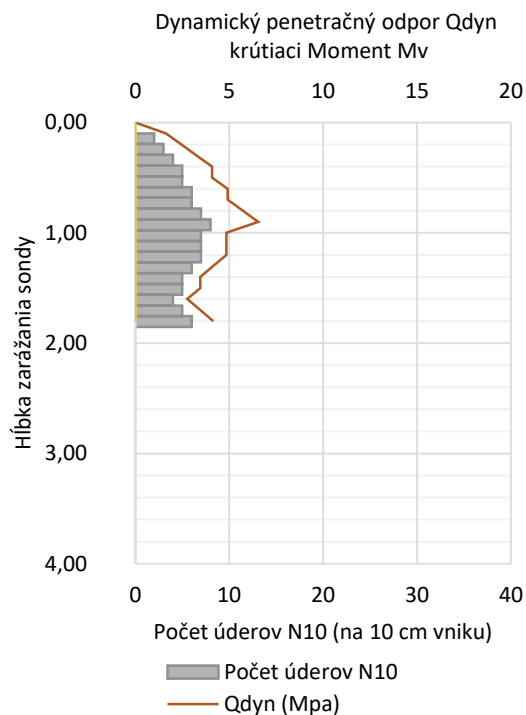
Tabuľka 8: Vyhodnotenie dynamickej penetračnej skúšky

| | q_{dyn} | I_D podľa vzťahu 1 | I_D podľa vzťahu 2 |
|---------|-----------|----------------------|----------------------|
| Sonda 1 | 3,261 | 0,25 | 0,16 |
| Sonda 2 | 4,098 | 0,3 | 0,24 |

Sonda 1



Sonda 2



Obrázok 3: Vyhodnotenie dynamického penetračného odporu q_{dyn}

5. Záver

Dynamická penetračná skúška je využívaná na stanovenie vlastností hrubozrnných zemín. Z výsledkov skúšok je možné použitím korelácií odvodiť vybrané geotechnické parametre. V článku som analyzovala stanovenie relatívnej uľahnutosti. Pomocou praktického príkladu odvodenia relatívnej uľahnutosti štrku použitím DPM som poukázala na nezrovnalosti medzi použitými koreláciami na odvodenie relatívnej uľahnutosti, ktoré vedú k významným rozdielom I_D . Uvedené rozdiely vznikli nezohľadnením rôznych typov dynamických penetračných prístrojov v použitých koreláciách. Mnohé publikované korelácie neuvádzajú, pre aký druh penetračnej skúšky boli odvodené (DPH, DPL alebo DPM).

Literatúra

- [1] MATYS, M. – ŤAVODA, O a CUNINKA, M.: *Polné skúšky zemín*. Bratislava: Alfa, 1990. 304 s. ISBN 80-05-00647-0
- [2] VRETTOS, C., PAPAMICHAEL, S.: Lagerungsdichte von nichtbindigen Böden aus Ramm- und Drucksondierungen – Eine aktualisierte Bewertung empirischer Beziehungen. *Geotechnik* 41 (2018), pp. 186-196
- [3] STN EN 1997-2:2008: Eurokód 7. Navrhovanie geotechnických konštrukcií. Časť 2: Prieskum a skúšanie horninového prostredia.
- [4] Švasta, M., IGHP n.p. závod Košice, 1978: Trebišov – Baums, Penetračné skúšky – súčasť podrobného inžiniersko-geologického prieskumu, správa č. 40376, ŠGUDŠ, Bratislava, 14 strán
- [5] OBERT, L., Dopravoprojekt, 1982: Dvory II, objekt D-II-8, MS Petržalka v Bratislave, dynamické penetračné skúšky, správa č. 53662, ŠGUDŠ, Bratislava, 11 strán
- [6] STN 72 1032: 1997: Dynamická penetračná skúška

Matúš Neusch¹

Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 2.ročník

POLOTUHÉ PRÍPOJE V DREVENÝCH KONŠTRUKCIÁCH S VYUŽITÍM ALUMIDI KONZOL

SEMI-RIGID CONNECTION IN TIMBER STRUCTURES USING ALUMIDI CONNECTORS

Abstract

In the engineering practice we put a special emphasis on designing a construction details. In many cases, the load-bearing structure is limited by load-bearing capacity of the connection and design requirements. An important aspect in the design of the connection is load-bearing capacity of individual fastener and rigidity of the connection as well. In the engineering practice connections with the hinge effect are designed and utilized most frequently. The joint connection allows for free bending. However, almost all connection have a certain degree of rotational stiffness. The real behaviour is somewhere in between the hinge impact and the rigid impact. The modern connections allow for semi-rigid impact.

Kľúčové slová

Polotuhý prípoj, Alumidi, rotačná tuhosť, FEM model

1. Úvod

V rámci dizertačnej práce sa budem venovať polotuhým prípojom s využitím kovového spájacieho prostriedku Alumidi. K dispozícii sú dva typy s rozdielnou výškou, a to Alumidi 160 a Alumidi 120 bez otvorov pre hladké kolíky.

Tieto spojovacie prostriedky sa používajú napríklad na pripojenie stropných nosníkov alebo stĺpov na primárnu nosnú konštrukciu. Alumidi konzoly sú dobrým príkladom polotuhého prípoja. Konzolu môžeme rozdeliť na dve časti, pri ktorých sa bude samostatne počítat' rotačná tuhosť. Tieto tuhostné konštanty budú neskôr použité pri návrhu nosnej konštrukcie. Prvá časť je pripojenie nosníka na konzolu Alumidi pomocou samorezných kolíkov. Druhá časť je pripojenie konzoly pomocou rebierkovaných klineciov na primárnu nosnú konštrukciu.

Táto práca nadväzuje na diplomovú prácu Ing. Attilu Rácza a Ing. Romana Katlera.

2. Výpočet rotačnej tuhosti

Pre výpočet rotačnej tuhosti oboch častí konzoly Alumidi platí rovnaký postup.

Výpočet polárneho momentu zotrvačnosti:

$$I_p = \sum r_i^2 \quad (1)$$

Premenná r vyjadruje vzdialenosť spojovacieho prostriedku od ťažiska skupiny spojovacích prostriedkov. Druhým krokom je výpočet strednej hodnoty modulu popustenia K_{ser} . Táto hodnota sa

¹ Matúš, Neusch, Ing.,KKDK, SvF STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

líši od typu spojovacích prostriedkov. Následne môžeme vypočítať rotačnú tuhosť danej časti prípoja pre medzný stav použiteľnosti (MSP).

$$C_{\varphi, MSP} = k_{ser,1} * n_{sr} * I_p \quad (2)$$

Hodnota n_{sr} vyjadruje počet strihových rovín v prípoji. Po vyčíslení rotačnej tuhosti pre MSP pokračujeme s výpočtom rotačnej tuhosti pre medzný stav únosnosti.

$$C_{\varphi, MSÚ} = \frac{C_{\varphi, MSP} * 2}{3} \quad (3)$$

3. Konštrukčné prípoje

3.1 Alumidi 120

Veľmi častým detailom vyskytujúcim sa v drevených konštrukciách je pripojenie stropného nosníka na stenu alebo prievlak. Stropný nosník z konštrukčného dreva s rozmermi 100/140mm sa pripája na nosník z lepeného lamelového dreva s rozmermi 160/360mm. Alumidi koncovka sa pomocou rebierkovaných klinec $\varnothing 4/60$ mm pripojí na prievlak a následne sa na Alumidi koncovku pripojí nosník pomocou samorezných kolíkov $\varnothing 7/93$ mm.

Prípoj bude vyhotovený v 4 variantoch. V každom variante sa mení počet klinec a kolíkov. Zmenou spojovacích prostriedkov sa mení aj rotačná tuhosť oboch častí prípoja.

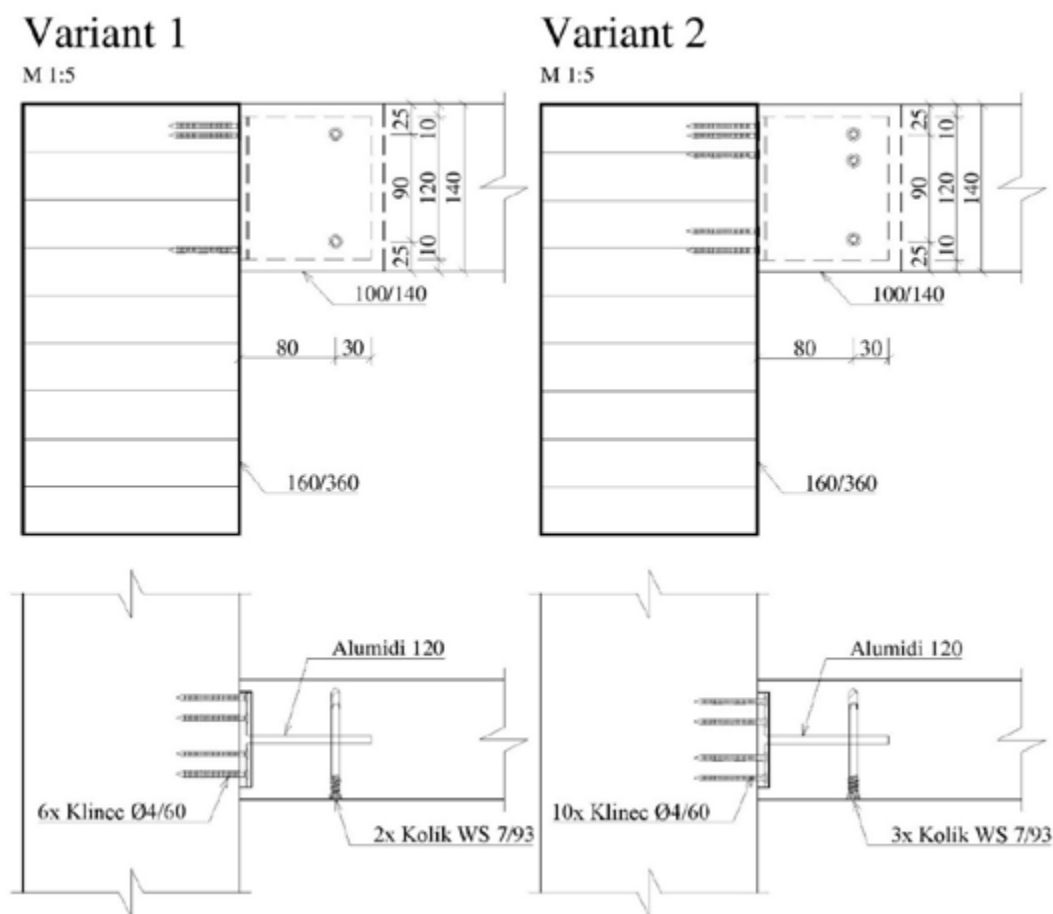


Figure 1. Alumidi 120, variant 1 a 2

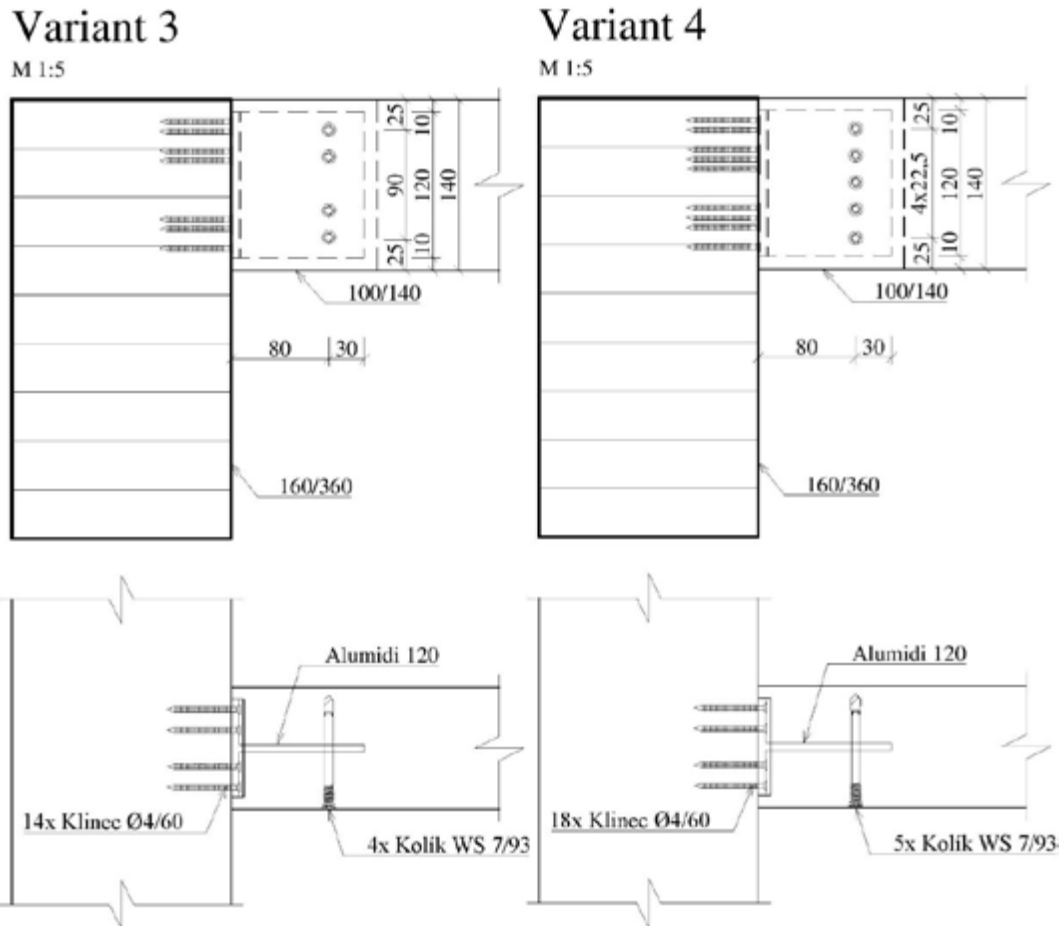


Figure 2. Alumidi 120, variant 3 a 4

3.2 Alumidi 160

Druhý prípoj je tvorený konzolou Alumidi 160. V tomto prípade sa nosník z konštrukčného dreva s rozmermi 100/200mm pripája na nosník z lepeného lamelového dreva s rozmermi 160/360mm. Alumidi konzola bude pripojená k prievlaku pomocou klinec $\varnothing 4/100$ mm a stropný nosník sa pripojí na konzolu pomocou samorezných kolíkov $\varnothing 7/93$ mm.

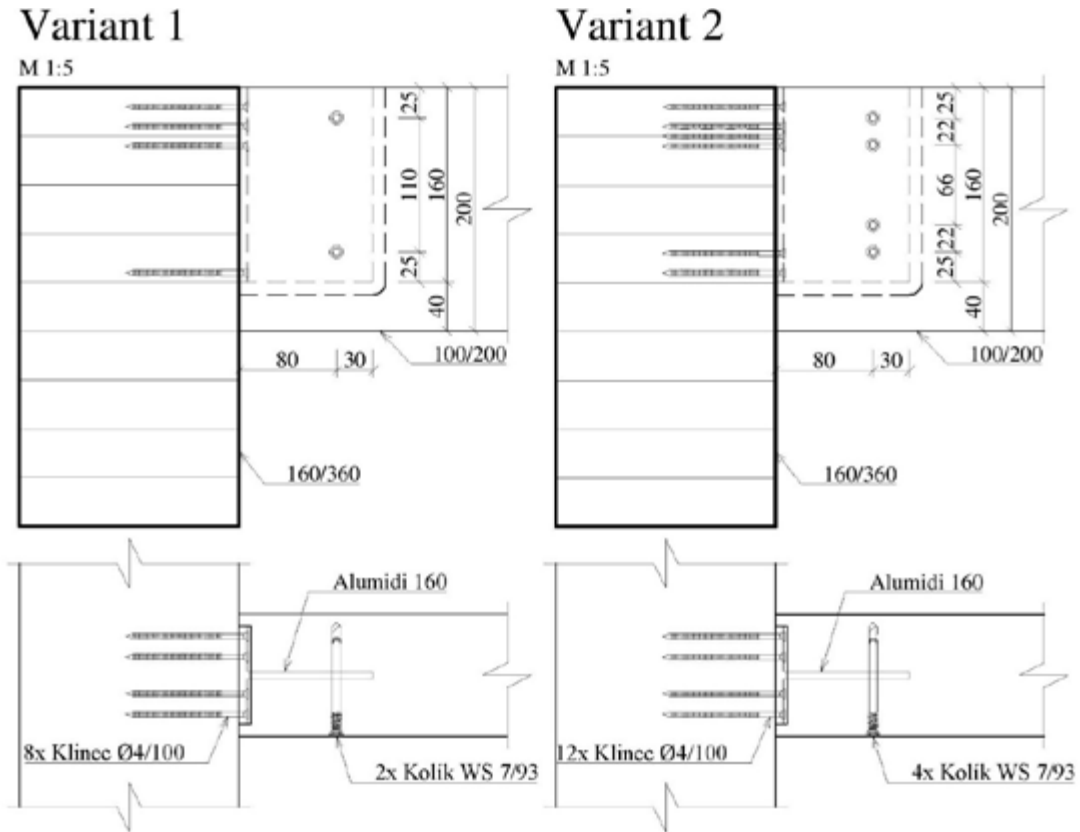


Figure 3. Alumidi 160, variant 1 a 2

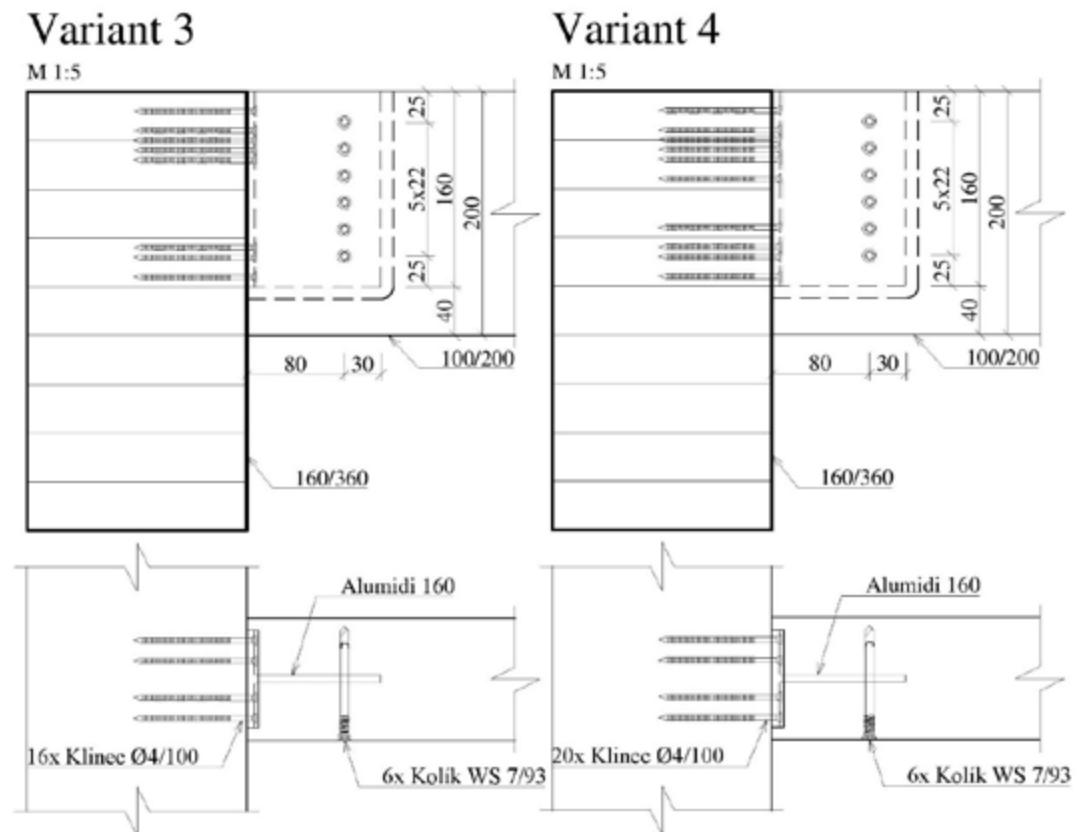


Figure 4. Alumidi 160, variant 3 a 4

Záver

Cieľom práce bude výpočet tuhostí jednotlivých prípojov a následné dosadenie do FEM modelov. Každý prípoj bude otestovaný v laboratóriu a výsledky experimentu budú porovnané s výsledkami z výpočtu a FEM modelu.

Celkovým zámerom teoretického a experimentálneho overovania je vyšetrenie reálneho správania sa prípojov, ktoré sú v bežnej praxi uvažované ako kĺbové. Správny návrh prípojov je dôležitý nie len kvôli bezpečnosti, ale má vplyv aj na celkové ekonomické hľadisko.

Literatúra

- [1] STN EN 1995-1-1 + A1: Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, SÚTN, 2008
- [2] Schickhofer, G.: *Holzbau Nachweisführen für Konstruktionen aus Holz* (Graz: Institut für Holzbau & Holztechnologie Technische Universität Graz), 2006
- [3] Katalóg Rothoblaas, dostupný 1.10.2019

Lucia Ondrušková¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: 2.

BODOVÉ UCHYTENIA V NOSNÝCH SYSTÉMOCH PRESKLENÝCH FASÁD

POINT FIXINGS IN STRUCTURAL GLASS FACADE SYSTEMS

Abstract

Glass is very popular in architecture nowadays and more and more daring structures are being built. The popularity of use of point-fixed glass facades is also increasing. There are several requirements, that glass facades have to satisfy – esthetical, physical and load-bearing. During the design, attention to the connections have to be paid, as concentrations of stress can occur there. This can affect final design of used glass type and thickness. The aim of this paper is to take a closer look at components of point fixings used in glass facades.

Kľúčové slová

Sklo, bodové podoprenie, skrutkový spoj, lepený spoj, pavúk, fasáda

1. Úvod

Sklo je jedným z najstarších materiálov vyrábaných človekom a začiatky jeho používania v architektúre sa datujú do čias Rímskej ríše. Sklo tradične slúžilo ako výplň okien a v súčasnosti sa možnosti jeho aplikácie rozšírili na presklené fasády, prestrešenia a iné, čo prinieslo vyššie statické požiadavky na sklené prvky. Snaha maximalizovať transparentnú plochu, ktorá by bola minimálne rušená spojovacími prvkami podnietila vývoj systémov s bodovými uchyteniami. Keďže sklo je krehký materiál, citlivý na koncentrácie napätí, je nutné venovať zvýšenú pozornosť práve prípojom k ostatným konštrukčným prvkom. V tomto príspevku sú popísané používané systémy bodových podoprení sklenených fasád.

2. Požiadavky na sklené fasády

Na fasády sú kladené viaceré požiadavky, ktoré treba pri návrhu zvážiť – architektonicko-estetické, fyzikálne a statické. Pod fyzikálne požiadavky spadajú napr. tepelnotechnické a akustické požiadavky, požiadavky prirodzeného osvetlenia a iné.

Sklené tabule prenášajú zaťaženia pôsobiace kolmo na ich rovinu – zaťaženie od vetra, a vo svojej rovine – vlastná tiaž, vplyv tepelnej rozťažnosti materiálov a zaťaženia vnášané pohybmi budovy v rovine fasády vplyvom vetra a seizmicity [1]. V niektorých prípadoch je nutné uvažovať aj mimoriadnymi zaťažzeniami ako napr. výbuch alebo náraz. Systémy sklenených fasád musia umožniť aj elimináciu výrobných imperfekcií – prostredníctvom oválnych a zväčšených otvorov na komponente pripojenia podpory skleneného panela k nosnej konštrukcii. Tieto otvory zároveň umožňujú aj zmeny rozmerov panela v jeho rovine vplyvom tepelnej rozťažnosti, čím sa predchádza vneseniu prídavných napätí do skleneného prvku. Pôsobením zaťaženia kolmého na rovinu panela

¹ Lucia Ondrušková, Ing., KKDK SvF STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

vznikajú priehyby skleného prvku. V mieste je vhodné použiť kľbové pripojenie, napr. kľbovú skrutku, a tak zamedziť vzniku prídavných napätí v okolí spoja. V prípade rozbitia alebo odstránenia niektorého skleného panela musí byť zabezpečený prenos zaťaženia zvyšnými prvkami.



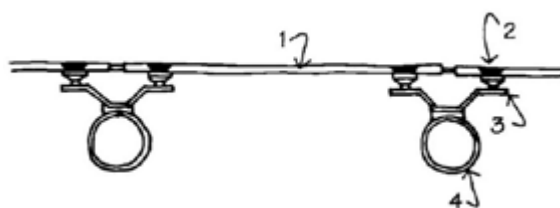
Obr. 1: a) kľb v úrovni skleného panela, b) kľb mimo skleného panela, c) pevná podpera [2]

3. Nosné systémy sklených fasád s bodovým uchytením skla

Vo všeobecnosti sa systém bodovo podpretej fasády skladá zo štyroch základných elementov: skleného panela, spoja, pripojenia podpery zasklenia k nosnej konštrukcii a nosnej konštrukcie – vid' obr. 2. Sklo môže byť uchytené v rohoch, prípadne aj v medziľahlých bodoch.

Systémy nosných konštrukcií sklených fasád možno zjednodušene rozdeliť na [3]:

- Fasády s použitím štandardných oceľových prvkov – stĺpov a nosníkov, prípadne sklenených rebier. V prípade väčších výšok fasády namiesto jednoduchých stĺpov možno použiť priehradový alebo Vierendelov nosník, hybridné systémy – vid' obr. 3.
- Fasády s použitím lanových systémov – tieto systémy pozostávajú z lán, ťahaných tyčí a rozperných prútov.



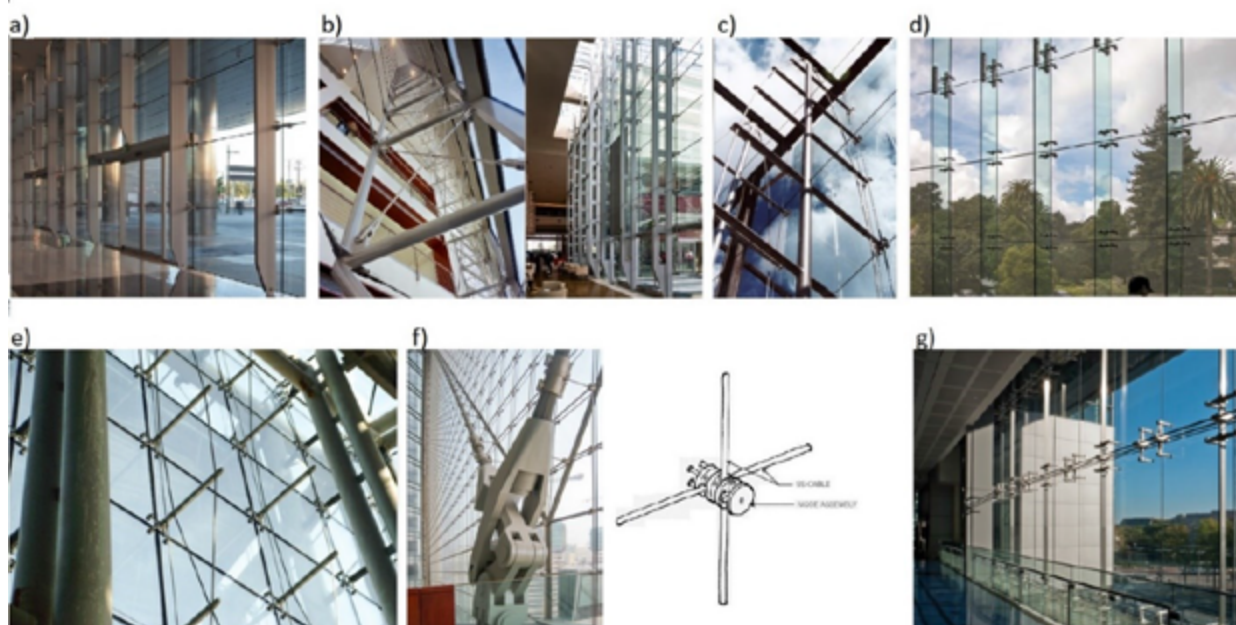
Obr. 2: Bodovo uchytený systém fasády [4] (1 – sklený panel, 2 – bodové uchytenie, 3 – pripojenie podpery zasklenia, 4 – nosná konštrukcia)

4. Pripojenie podpery zasklenia

4.1 Uholníky

Najjednoduchšou formou pripojenia podpery skla k nosnej konštrukcii je použitie uholníkov, ktoré môžu byť k nosnej konštrukcii buď privarené, alebo priskrutkované k oceľovej platni navarenej na nosnej konštrukcii, vid' obr. 4. Výhodou priskrutkovaných uholníkov je možnosť upravenia polohy uholníka pomocou oválnych otvorov a použitím podložiek vo všetkých troch smeroch.

Tento typ pripojenia podpery zasklenia umožňuje v obmedzenej miere pootočenia okolo pozdĺžnej osi uholníka, avšak ich zohľadneniu vo výpočtoch treba venovať zvýšenú pozornosť, keďže môže ľahko dôjsť k prekročeniu únosnosti skleného panela. [4]



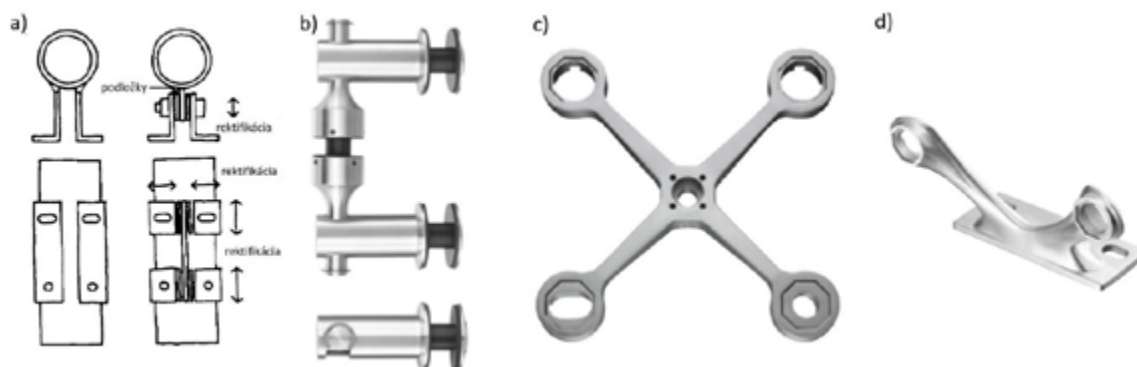
Obr. 3: Nosné konštrukcie fasád a) stĺpková, b) priehradový a Vierendelov nosník, c) stĺp sťažňového typu, d) sklené rebrá, e) lanový nosník, f) lanová sieť, g) laná a stĺpiky [4][5]

4.2 Pripojenia hák-čap

Čapové pripojenia, pozostávajúce z čapu a háku, umožňujú rotáciu skleneného panela okolo osi čapu a posuny v smere jeho osi [4], vid'. obr. 4. Sú alternatívou k „pavúkom“ a kĺbovým skrutkám.

4.3 Terčové podpory (pavúky)

Tzv. „pavúky“ pozostávajú z viacerých ramien, väčšinou dvoch alebo štyroch. Sklené prvky za pripájajú k jednotlivým ramenám. K nosnej konštrukcii pripojené centrálnou časťou v jednom bode pomocou skrutky, alebo pomocou ocelej platne privarenej k nosnej konštrukcii. Ramená môžu byť pevné alebo s kĺbom.



Obr. 4: Pripojenia podpory zasklenia a) uholník, b) hák-čap, c) „pavúk“ s centrálnou skrutkou, d) „pavúk“ s platňou [6]

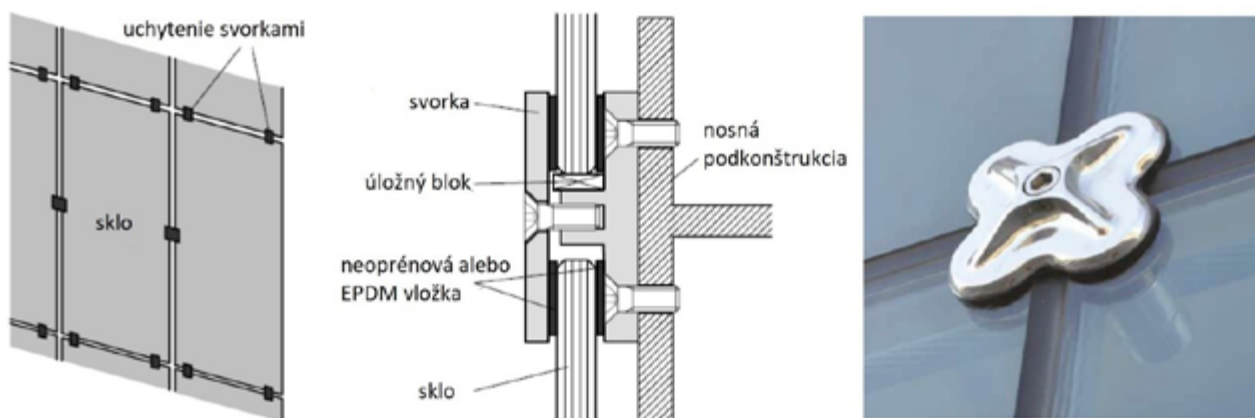
5. Spoje

Bodové uchytenia sklenených konštrukcií sa začali uvádzať do praxe približne v polovici sedemdesiatych rokov, keď sa začali používať svorkové spoje [7]. Všeobecnou zásadou v spojoch je,

že je potrebné sa vyvarovať priamemu kontaktu medzi sklom a oceľovým prvkom, alebo ďalším skleneným prvkom použitím vhodnej medzivrstvy. Medzivrstva musí mať dostatočnú tuhosť, pevnosť a trvanlivosť. Používajú sa vložky na báze plastov, živice, neoprén, injektážne malty, hliník alebo vložky z vláknitých materiálov.

5.1 Svorkové spoje

Svorky sú umiestnené v rohoch alebo na okrajoch skleneného panela. Výhodou tohto spoja je, že nevyžaduje otvory v skle a je ľahko rozoberateľný. Trecie sily medzi sklom a svorkou nie sú veľké. V prípade vertikálnych sklenených prvkov sú panely na spodnej hrane uložené na úložné bloky, ktoré prenášajú vlastnú tiaž skla do nosnej konštrukcie. V závislosti od umiestnenia a geometrie, svorky môžu obmedziť deformácie skleneného prvku a pri jeho návrhu je nutné uvažovať so vzniknutými napätiami. Pootočenie okrajov panela sa dá umožniť použitím dostatočne hrubej a mäkkej vložky medzi sklom a kovovou svorkou. [7]



Obr. 5: Svorkový spoj [7] a detail fasády [8]

5.2 Skrutkové spoje

Výhodou skrutkových spojov okrem ich estetického vzhľadu je možnosť ich rozobratia bez poškodenia jednotlivých konštrukčných prvkov. Veľkosť napätí vznikajúcich v spoji vyžaduje použitie tepelne upraveného skla, v ktorom práve v blízkosti otvorov dochádza k deformácii priebehu reziduálnych napätí, čo ovplyvňuje pevnosť skla v daných oblastiach. Taktiež sa tu vyskytuje zvýšený počet mechanických poškodení povrchu skla, zapríčinený vŕtaním otvorov [9]. Okrem toho napätia v spoji môžu byť ovplyvnené [9][10]:

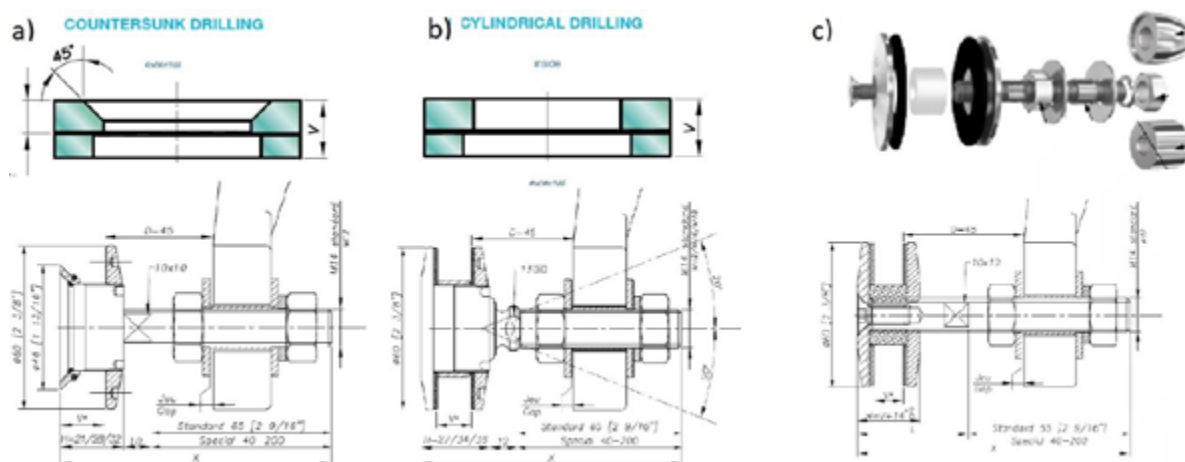
- „tesnosťou otvoru“ - rozdiel medzi priemerom otvoru a priemerom skrutky
- geometriou skleneného prvku a spoja – hrúbka použitého skla, umiestnenie otvorov od okraja a medzi sebou
- materiálom vložky medzi sklom a skrutkou a trením medzi vložkou a sklom
- excentricitou zaťaženia

Skrutkové spoje možno rozdeliť na pevné a kĺbové. V prvom prípade je pri návrhu nutné uvažovať s prídavnými napätiami v blízkosti spoja, v druhom prípade je umožnené pootočenie skleneného panela, a tak nie sú vnášané skla ďalšie napätia. Kĺb môže byť umiestnený v úrovni skla, za sklom alebo na úrovni pripojenia podpory zasklenia [10].

Skrutky používané v bodovo uchytенých fasádach majú špeciálne tvarovanú hlavu, ktorá prechádza sklom. Spoj je namáhaný strihom a otláčením. Najjednoduchším prípadom je skrutka s valcovou hlavou, kde časť hlavy skrutky vytrča z roviny zasklenia a otvor v skle má jednoduchý valcovitý tvar. V prípade skrutky so zapustenou hlavou má otvor kónický tvar a hlava skrutky je

zapustená do roviny skla. Komplikovanejšia geometria v kombinácii s výrobnými nepresnosťami môže do skla viesť väčšie napätia v porovnaní s použitím skrutky s valcovou hlavou. [4][7]

V prípade trecích spojov sú z oboch strán skla umiestnené oceľové platničky spolu s vhodnou medzivrstvou, ktoré sú stiahnuté skrutkou s predpísaným ťahovacím momentom. Aby sa predišlo kontaktu skla a skrutky je použitý väčší otvor, prípadne použitím vhodných vložiek. Väčšie otvory zároveň umožňujú aj rektifikáciu skleneného prvku pri montáži. Sily medzi prvkami sa prenášajú trením a rozložia sa na väčšiu plochu, čo zabezpečuje vyššiu únosnosť pri zaťažení v rovine i kolmo na rovinu skleneného panela. Medzivrstva medzi sklom a platňou musí odolávať normálovým napätiam vnášaným skrutkou bez toho aby bola vytláčaná mimo spoja a taktiež šmykovým napätiam vznikajúcim od zaťaženia pôsobiacich v rovine sklenej tabule. Musí preukazovať nízku mieru dotvarovania, aby sa predišlo postupnému znižovaniu miery predpätia v skrutkách. V prípade použitia vrstveného skla môže pri niektorých typoch fólií dôjsť k jej vytláčaniu a veľkým deformáciám vplyvom tečenia. V oblasti spoja je v týchto prípadoch vhodné nahradiť fóliu tuhším materiálom rovnakej hrúbky ako fólia, napr. zliatiny hliníka. [4][7]



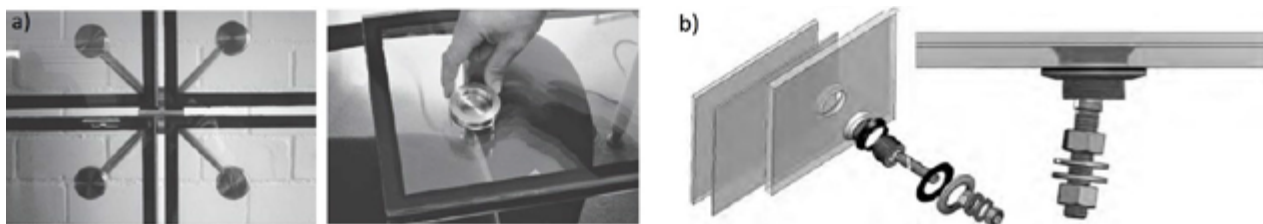
Obr. 6: Skrutkové spoje a) pevná zapustená skrutka [6], b) kĺbová skrutka s valcovou hlavou [6], c) trecí spoj [6]

5.3 Lepené spoje

Prednosťou lepených spojov je, že v porovnaní so skrutkovými spojmi sa sily v spoji roznášajú rovnomernejšie a sklenený panel nie je oslabený otvormi. Spoje fungujú na princípe adhézie – príľnavosti lepidla k povrchu a kohézie – súdržnosti lepidla. Pevnosť a spoľahlivosť spoja však ovplyvňuje viacero faktorov – kvalita vyhotovenia, čistota spájaných povrchov, geometria spoja, veľkosť a dĺžka trvania zaťaženia, UV žiarenie, vlhkosť, chemické látky, teplota a iné. V bodových uchyteniach sa používajú najmä tuhé lepidlá preukazujúce vyššiu pevnosť v porovnaní s mäkkými lepidlami. Tieto spoje sa však porušujú krehko, keďže nie sú schopné väčších deformácií. Hrúbka nanášania 0,1 až 0,5 mm neumožňuje eliminovať výrobné imperfekcie [2]. Schopnosť redistribuovať koncentrácie napätí je obmedzená, preto prvky prilepené ku sklu musia mať vhodnú geometriu a úpravu hrán [7].

5.4 Spoj s vsadenou hlavou

Vývoj nových ionomérových fólií pre vrstvené sklá s vyššou únosnosťou a odolnosťou voči vplyvom okolitého prostredia umožnil pripojiť kovové spájacie prvky k fóliovej medzivrstve vrstveného skla. Sily v spojoch s vloženou hlavou sa prenášajú pomocou adhézie a kohézie v čelnej oblasti a pomocou otláčania, čím sa dosiahne rovnomernejšie rozdelenie napätia v spoji [11].



Obr. 7: a) lepený spoj [2], b) spoj s vsadenou hlavou [9]

6. Záver

Keďže neexistuje platná norma na základe ktorej možno navrhovať spoje sklenených konštrukcií, je potrebné vytvoriť správny model v software-i na báze MKP alebo overiť únosnosť spoja experimentálnymi skúškami. Pri návrhu spojov je nevyhnutné zohľadniť celý systém pozostávajúci zo skleneného prvku, samotného spoja, pripojenia k nosnej konštrukcii a nosnej konštrukcie aby nedošlo k vzniku nepredvídaných napätí v sklenom prvku, ktoré by zapríčinili jeho porušenie. Estetické nároky na konštrukcie viedli k vývoju viacerých systémov bodových podopretí sklenených panelov. V tomto článku som sa venovala popisu jednotlivých komponentov a faktorom ovplyvňujúcich ich návrh.

Literatúra

- [1] SIVANERUPAN, S. et al.: In-plane drift capacity of point fixed glass facade systems. In: *Australian Earthquake Engineering Society 2010 Conference, Perth, Western Australia* [online]. Dostupné na internete: <<http://aees.org.au/wp-content/uploads/2013/11/43-Sivanerupan.pdf>>
- [2] WURM, J.: *Glass Structures*. Basel: Birkhäuser Verlag AG, 2007. 255 s. ISBN 978-3-7643-7608-6.
- [3] VYZANTIADOU, M. A.: - AVDELAS, A. V.: Point fixed glazing systems: technological and morphological aspects. *Journal of Constructional Steel Research*. 2004, roč. 60, č. 8, s. 1227-1240. ISSN 0143-974X.
- [4] RYAN, P. – OTLET, M. and OGDEN, R. G.: *Steel Supported Glazing Systems*. Ascot: The Steel Construction Institute, 1997. 74 s. ISBN 1 85942070 2.
- [5] Dostupné na internete: <<http://www.enclos.com/service-and-technology/technology/structural-glass-facades/facade-structures>>
- [6] Dostupné na internete: <http://www.sadev.com/wp-content/uploads/2012/06/SADEV_CLASSIC_08_ATTACHES.pdf>
- [7] HALDIMANN, M. – LUIBLE, A. and OVEREND, M.: *Structural Use of Glass*. Zürich: IABSE-AIPC-IVBH, 2008. 215 s. ISBN 978-3-85748-199-2.
- [8] Dostupné na internete: <<https://faraone.it/en/publications-faraone/facciate-sospese/>>
- [9] OVEREND, M.: *The Appraisal of Structural Glass Assemblies*: dizertačná práca. Guildford: University of Surrey, 2002. 228 s.
- [10] MANIATIS, I.: *Numerical and Experimental Investigation on the Stress Distribution of Bolted Glass Connections under In-Plane Loads*: dizertačná práca. München: Technische Universität München, 2006. 193 s.
- [11] CRUZ, P. J. S. et al.: Embedded Glass Fixing System – Characterization and Conceptual Validation. In: *engineered transparency. International Conference at glasstec*. Düsseldorf, Germany, 29-30 September 2010. s. 213-220

Adam Petřík¹

Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 2. ročník

SPRIAHOVACIE LIŠTY S OTVORMI AKO SPOLĀHLIVÝ SPRIAHOVACÍ PROSTRIEDOK V STAVEBNÍCTVE

PERFORATED SHEAR STRIPS AS A RELIABLE SHEAR CONNECTOR IN CONSTRUCTION

Abstract

Composite structures are used to achieve higher load-bearing capacity and better usage of materials for several decades. Shear connectors, which provide the coupling of materials, have been gradually evolved from the simplest methods as natural bond to innovative shear connectors, also named composite dowels. Many of different shapes of the openings were investigated and their bearing and deformation parameters were observed. Beside the fact, that these innovative connectors provide high durability compared to widely used shear connectors as studs with head, only some of opening shapes provide adequate fatigue resistance for usage in composite bridges. The scope of usage of these connectors after further research can be extended to new areas in civil engineering.

Klíčové slová

Spriahnutie, spriahovacie lišty, WFT-WIB, externá výstuž.

1. Úvod

Využívanie spriahnutých konštrukcií je už niekoľko desaťročí snahou stavebných inžinierov dosiahnuť lepšie využitie materiálov v konštrukcii, prípadne zväčšenie únosnosti prvkov stavebnej konštrukcie. To je dosiahnuté pomocou spolupôsobenia dvoch či viacerých druhov materiálov v rámci jedného stavebného prvku pomocou spriahovacích prostriedkov. V priebehu rokov dochádzalo k postupnému vývoju od najjednoduchších foriem spriahovania materiálov až po vznik rôznorodých inovatívnych metód spriahovacích prostriedkov, ktoré sa líšia v materiálových či konštrukčných oblastiach použitia, alebo v ich vlastnostiach a parametroch. Pri vhodných kombináciách materiálov v stavebnom prvku je možné kritické miesta eliminovať a tým dokonca priaznivo ovplyvniť dimenzie predmetných prvkov. Aj keď viaceré z inovatívnych metód (ako napríklad spriahovacie lišty s otvormi) vykazujú priaznivé vlastnosti, ich použitie je veľmi limitované z hľadiska absencie návrhových postupov uvedených v platných normách a s tým súvisiacia absencia dostatočných skúseností ako pri projekcii, tak aj pri realizácii konštrukcií s predmetnými spriahovacími prostriedkami.

Článok rekapituluje históriu vývoja spriahnutých konštrukcií so zameraním na spriahovacie lišty s otvormi ako spriahovacieho prostriedku. Predkladá ich vlastnosti, prednosti a nedostatky, popisuje ich správanie a použitie a budúce ciele výskumu.

¹ Adam Petřík, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Vazovova 5, 821 43 Bratislava

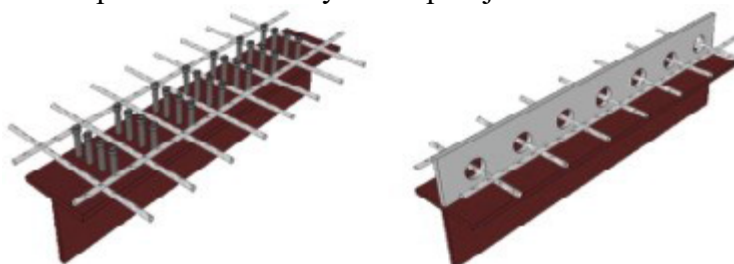
2. História

Snaha maximalizovať efektívnosť konštrukcií je v stavebníctve od nepamäti, s čím súvisí aj neustále úsilie kombinovať jednotlivé materiály v rámci stavebných konštrukcií na časti, kde ich vlastnosti umožňujú plne využiť ich potenciál. Táto snaha však v minulosti narážala na problém bezpečne zabezpečiť prenos síl z jedného materiálu do druhého z dôvodu absencie kvalitných spriahovacích prostriedkov. Preto sa ako jeden z prvých spôsobov spriahovania stavebných prvkov využívalo zdrsnenie kontaktných plôch jednotlivých prvkov. Táto metóda bola veľmi neefektívna, no do päťdesiatych rokov 20. storočia patrila medzi najčastejšie používané.



Obrázok 1: Príklady spriahovacích prostriedkov [1]

Práve v tom čase dochádza k výskumu aj iných, viac účinnejších foriem spriahovacích prostriedkov. Do popredia sa dostávajú trne s hlavou, blokové zarážky, korunné záchytky či mnohé iné (obr. 1). Tie poskytujú prenos omnoho vyšších síl medzi materiálmi v porovnaní so zdrsnením povrchov. Mnohé výskumné tímy sa snažili pochopiť správanie týchto prostriedkov a nájsť ich slabé miesta. Tým sa zároveň formulovali prvé požiadavky na predmetné prostriedky, rovnako ako aj prvé návrhové odporúčania či predpisy. Aj do súčasnej doby sú stále najviac používané trne s hlavou, ktoré vykazujú veľmi dobré statické vlastnosti, rýchlu a ekonomickú výrobu a dostatočné množstvo skúseností ako na strane projektantov, tak aj v prípade realizátorov. Aj z tohto hľadiska je tento typ spriahovacích prostriedkov podrobne zahrnutý v európskej norme STN EN 1994-1-1.

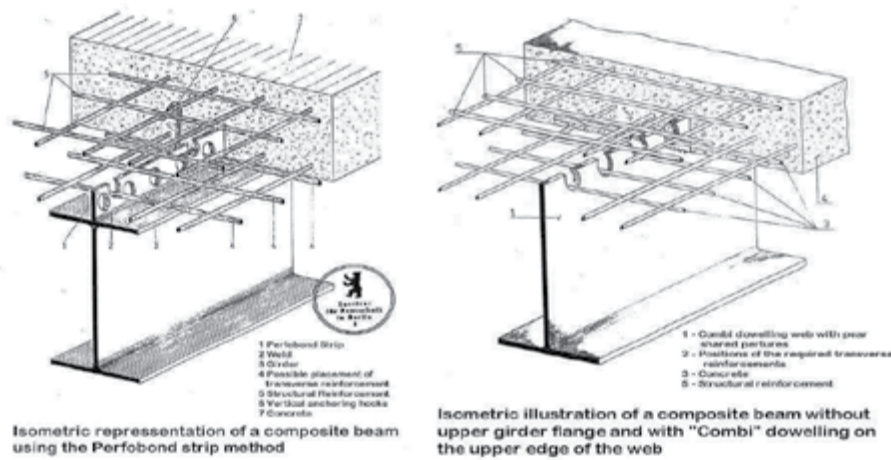


Obrázok 2: Spriahnutý nosníka s trnmi s hlavou (vľavo) a so spriahovacou lištou s otvormi (vpravo) [2]

Preto sa stále projektanti a realizátori zameriavajú na použitie síce starších, no dlhšie používaných metód spriahnutia, ktoré sa často v praxi javia ako prekonané, ekonomicky, časovo či staticky neefektívne v porovnaní s inovatívnymi metódami spriahovacích prostriedkov, čo negatívne ovplyvňuje celý proces projekcie, výstavby a prevádzky stavebných konštrukcií. V praxi sa vyskytujú aj iné druhy spriahovacích prostriedkov, no v porovnaní s trnmi s hlavou v oveľa menšej miere vzhľadom na ich menej priaznivé vlastnosti.

Výskum sa však v 80. rokoch dvadsiateho storočia zameriava na nový typ spriahovacieho prostriedku – spriahovacej lišty s otvormi. Ako prvá prichádza nemecká spoločnosť Andrä s lištou Perfobond® (obr. 3). Kontinuálny spriahovací prvok, ako je často v literatúre táto lišta označovaná, je priebežný oceľový pás, najčastejšie privarený k hornej pásnici oceľového nosníka (obr. 2). Jeho strednicová rovina je kolmá na betónovú dosku, v ktorej je táto lišta zapustená, pričom sú v nej kruhové uzatvorené otvory pre prevlečenie betonárskej výstuže. Takto zhotovené šmykové spojenie sa vyznačovalo veľmi priaznivými statickými vlastnosťami, ako je vyššia tuhosť a únosnosť, ľahká výroba, geometrická variabilita a vhodné deformačné parametre. V rovnakom čase sa Technická univerzita v Kaiserslauterne zameriava na vývoj podobného typu spriahovacej lišty (v literatúre uvádzanej Kombidübeliste) s otvorenými otvormi tvaru trapezoidu či kvapky (obr. 3). Prvotným

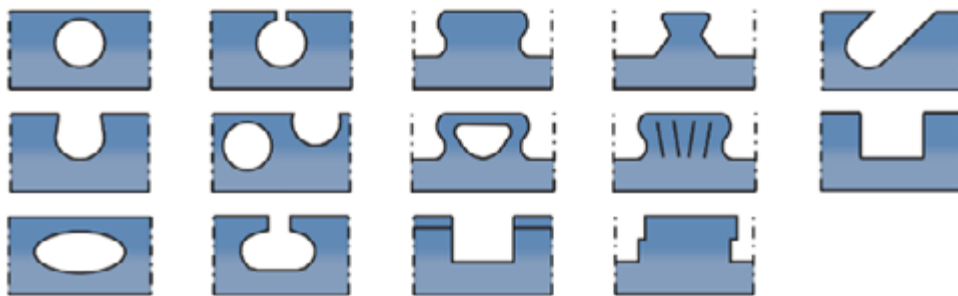
skúmaním sa potvrdilo, že spriahovacie lišty s otvormi môžu byť kvalitnou alternatívou konvenčným spriahovacím prostriedkom, čo viedlo v rozšírenie skúmania perforovaných lišt po celom svete.



Obrázok 3: Spriahovacia lišta Perfibond® (vľavo) a Kombidübelleiste (vpravo) [3]

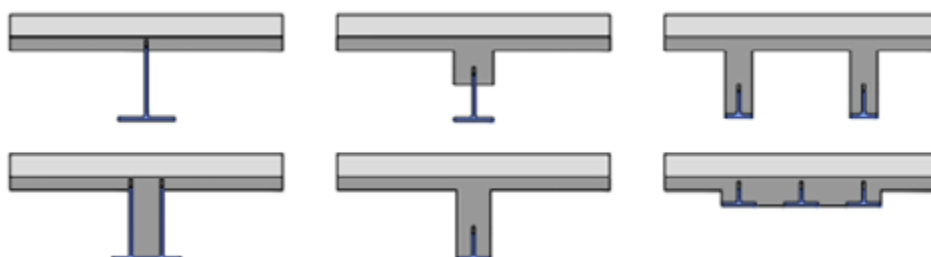
3. Súčasnosť

Posledné roky sa vývoj intenzívne zamerlal na praktické využitie týchto spriahovacích prostriedkov v mostnom a v malej miere aj pozemnom stavitelstve. Výskum sa vo svetovom meradle posunul natoľko, že v dnešnej dobe existujú viaceré úspešné projekty (most v Simmerbachu, most v Pöcking) ako ďalšia etapa skúmania týchto konštrukcií v reálnej prevádzke. S tým súvisí aj rozšírené skúmanie únavovej odolnosti týchto prostriedkov, ktorá je nevyhnutná pre použitie v mostných konštrukciách. Došlo aj k vytvoreniu nových tvarov otvorov (obr. 4), výskum iných bol ukončený z dôvodu prekonania ich vlastností iným tvarom otvorov či praktickými obmedzeniami pri výrobe či realizácii (napr. uzatvorené otvory, do ktorých sa priečna ťahová výstuž ukladá veľmi ťažko).



Obrázok 4: Rôzne tvary otvorov, ktoré boli skúmané [4]

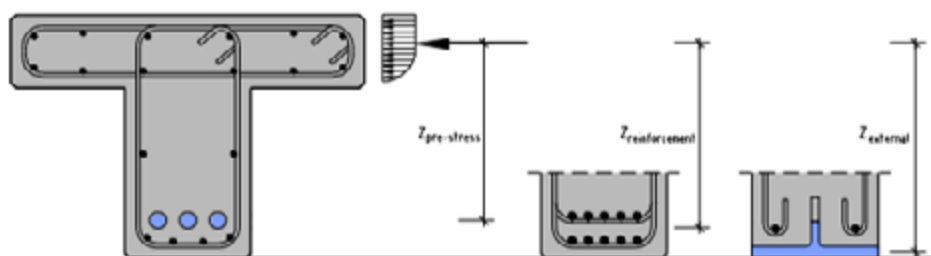
Okrem toho sa zmenil aj proces výroby týchto lišt, čím vznikli VFT-WIB nosníky (PrecoBeam projekt). V tomto prípade sa jedná o oceľový nosník rozrezaný na dve časti tak, že v jeho stene vznikli



Obrázok 5: Príklady priečných rezov nosníkov VFT pre použitie v praxi [5]

požadované tvary otvorov spriahovacej lišty. Takto upravené ocelové časti sa vo výrobe spriahnu spolu so železobetónovou doskou (prípadne spolu s obetónovanou stenou), čím vznikne jeden prefabrikovaný spriahnutý ocelobetónový konštrukčný prvok, ktorý je pripravený k prevozu na stavenisko a zabudovanie. Je možné vytvoriť rôznorodé priečne rezy takýchto spriahnutých prvkov, čo umožňuje ich využitie na mnohých stavebných dielach (obr. 5).

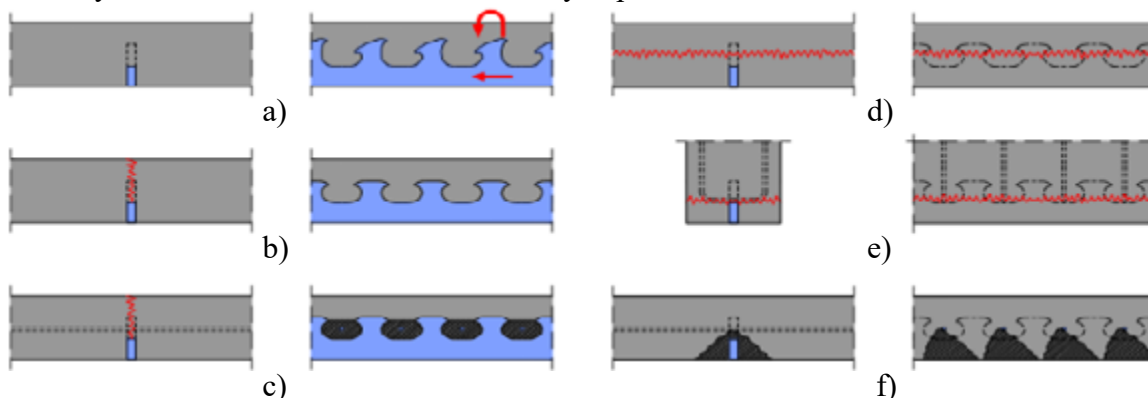
Okrem nesporných výhod pri výrobe a realizácii stavebných konštrukcií s týmito konštrukčnými prvkami sa takéto spriahnuté prvky vyznačujú aj priaznivými statickými vlastnosťami. Dopomáha k tomu aj samotný ocelový nosník, ktorý zároveň funguje ako externá výstuž. Rameno síl sa týmto zväčšilo (v porovnaní s predpäťmi betónovými konštrukciami je rameno síl možné zvýšiť o 20 %), čo priaznivo vplýva na odolnosť týchto konštrukcií (obr. 6). Častokrát je možné použiť taký ocelový profil, ktorým sa dosiahne také ekvivalentné množstvo výstuže, ktoré by sa betonárskou výstužou poskytnúť nedalo. Samotnú betonársku výstuž však rozpolený ocelový nosník plne nenahrádza, neustále je potrebná najmä priečna betonárska výstuž, ktorá je umiestnená v otvoroch spriahovacej lišty a zachytáva priečny ťah, ako aj ostatná betonárska výstuž zabezpečujúca odolnosť a spoľahlivosť konštrukcie.



Obrázok 6: Porovnanie vnútorných ramien síl pri rôznom druhu výstuže [5]

4. Porušenia konštrukcie

Limitujúcim faktorom v návrhu týchto konštrukcií je ich porušenie. Nakoľko nejde o homogénny prvok, porušenie je rôznorodé. Vo všeobecnosti je možné povedať, že existujú tri typy porušení, a to porušenie ocelevej časti lišty (obr. 7a), betónovej časti lišty a kombinované porušenie častí lišty. Porušenie betónovej časti je možné rozdeliť na nasledovné kategórie: vertikálna trhlina v betónovej časti (obr. 7b) (v prípade nevystuženej betónovej časti), ušmyknutie betónovej časti spojenia (obr. 7c), horizontálna trhlina v betónovej časti (obr. 7d), odlupovanie betónovej časti spojenia (obr. 7e) a vylomenie kužeľa z betónovej časti spojenia (obr. 7f). Na to, aké porušenie prvku nastane a pri akej deformácii vplýva viacero faktorov, ako geometrické usporiadanie lišty, jej hrúbka a materiál, ako aj pevnosť betónu, stupeň vystuženia či celkové geometrické usporiadanie prvku. Výhodné je sa dopracovať k takej kombinácii materiálov, aby nastalo kombinované porušenie, čo znamená optimálne využitie materiálu v rámci konštrukčných prvkov.



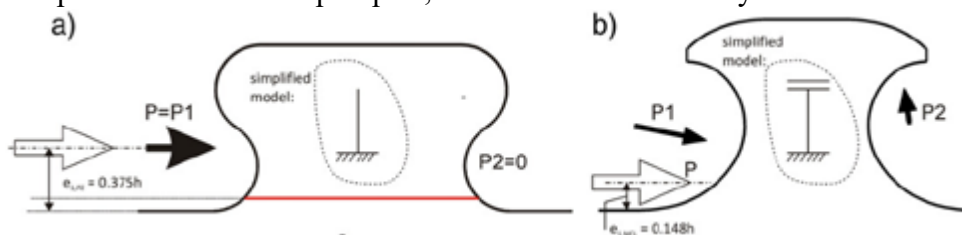
Obrázok 7: Porušenia šmykového spojenia prostredníctvom perforovanej lišty [5]

Pre inžiniersky návrh takýchto konštrukcií bol preto vypracovaný návrhový postup uvedený vo všeobecnom typovom schválení k spriahnutým oceľobetónovým konštrukciám s perforovanou lištou s tvarom otvorov v tvare puzzle [6]. Toto schválenie obsahuje návrhové postupy rešpektujúce modely porušenia a zaručuje bezpečný návrh konštrukcie.

5. Spriahovacia lišta s otvormi ako predmet výskumu

Ako už bolo vyššie spomenuté, spriahovacie lišty s otvormi rôznych tvarov sú veľmi sľubným typom spriahovacieho prostriedku, ktorý je možné využiť v širokom spektre konštrukcií. Stále však existujú medzery, ktoré je potrebné vyplniť výskumom, ako aj možnosť rozšírenia použitia týchto prvkov na iné typy konštrukcií.

Posledné roky sa výskum zameriava najmä na dva tvary týchto perforovaných lišt, a to konkrétne typ MCL (modified clothoidal) a PZ (puzzle shape) (obr. 8). Je to dané tým, že dané tvary vykazujú veľmi dobré vlastnosti pod statickým aj dynamickým zaťažením a ich únosnosť a odolnosť je dostatočne vysoká, prebehol a stále prebieha ich výskum v laboratórnych podmienkach ako aj na existujúcich stavbách, čím sa získavajú stále nové a nové údaje a skúsenosti. Pre inžiniersku prax je ich použitie takisto priaznivo ovplyvnené existenciou vyššie uvedeného schválenia. Nevýhodou je ich absencia v platnom normovom predpise, čo bráni ich širokému využitiu v rámci ostatných krajín.



Obrázok 8: Geometria so schémou namáhania oceľových zubov tvaru PZ (vľavo) a MCL (vpravo) [7]

Treba povedať, že napriek tomu, že otvory sú si podobné, vzhľadom na ich odlišnú geometriu sa mení aj ich správanie pri deformovaní – v prípade tvaru MCL môžeme hovoriť že ich statická schéma je votknutý koniec spolu s posuvným votknutím, kým tvar PZ je možné opísať ako konzolu. Aj vďaka týmto zjednodušeniam je možné dopredu odhadovať ich správanie pri zaťažovaní.



Obrázok 9: Plastické deformácie konektorov spriahovacej lišty - červené oblasti znázorňujú „hot spots“ na zube typu MCL (vľavo) a PZ (vpravo)

Konečnoprvkovou analýzou v softvéri ANSYS bolo analyzované správanie sa oboch tvarov otvorov. Potvrdilo sa, že slabým miestom tohto šmykového spojenia sú kontaktné plochy – tu vznikajú a šíria sa do oboch materiálov namáhania. Tie sa majú snahu koncentrovať, čo v prípade betónu nedochádza – dochádza k jeho porušovaniu. V prípade ocele sa dajú koncentrácie napätia v oceli pozorovať a vznikajú tzv. hot spots (obr. 9). Sú to prvé miesta (zvyčajne krčky oceľových zubov), kde začína materiál plastizovať a sú budúcimi potenciálnymi miestami vzniku porušenia. Taktiež absencia či nedostatok priečnej ťahovej výstuže môže veľmi negatívne ovplyvniť odolnosť tohto spojenia. V blízkosti kontaktu s oceľovou časťou je namáhanie v betóne kvázi hydrostatické,

no v ostatných oblastiach sa vo veľkom začína prejavovať priečny ťah, ktorý je potrebné zachytiť predmetnou výstužou.

6. Záver

Spriahovacie lišty s otvormi sa profilujú ako veľmi perspektívny spriahovací prvok, ktorý dokáže ešte viac zatriktívniť spriahnuté konštrukcie a generovať úsporu finančných prostriedkov a času pri realizácii stavebných projektov. V priebehu posledných rokov prebehlo viacero výskumov, počas ktorých došlo k viacerým experimentom či dokonca stavbám, na ktorých sa dá pozorovať správanie sa týchto konštrukcií pod reálnym zaťažením. Chýbajúce normové predpisy, ako aj s tým súvisiace skúsenosti v projekcii a realizácii sťažujú ich rozšírenie do ďalších krajín sveta. Stále je možné optimalizovať tvary otvorov, prípadne vytvoriť ďalšie, ktorých odolnosť či iné vlastnosti môžu byť priaznivejšie v porovnaní už so skúšanými tvarmi. Chýbajú aj komplexné porovnávacie štúdie, ktoré by poskytli projektantom prehľad o vlastnostiach týchto spriahovacích prostriedkov. Takisto je potenciál využiť tieto prvky aj v iných stavebných konštrukciách, ako napríklad drevobetónové dosky, či ako konektory pre prípoj oceľových prvkov do betónových konštrukcií. Aj preto je výskum perforovaných lišt stále aktuálny a potenciálny do budúcnosti.

Literatúra

1. Záverečná práca

Zapfe, C.: *Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit Betondübeln zur Übertragung der Längsschubkräfte*. Universität der Bundeswehr München. 2001, pp 1-2.

2. Článok v časopise

Kim, S. H. - Park, S. - Kim, K. S. - Jung, C. Y.: Generalized formulation for shear resistance on Y-type perfobond rib shear connectors. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 128, 2007 pp 245–260, ISSN: 0143-974X

3. Online prednáška

Brendel, I.: *New Types of Composite Beam and Dowel-Bonding System*, 2001, http://landhaus-brendel.privat.t-online.de/vortrag/Prolog_e/Part2/part2.html

4. Záverečná práca

Heinemeyer, S.: *Zum Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern aus ultrahochfestem Beton mit Verbundleisten*, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2011

5. Výskumná správa

PreCo-Beam, *Prefabricated enduring composite beams based on innovative shear transmission*, Final Report, Research Fund for Coal and Steel, 2009, Contract No. RFSR-CT-2006-00030.

6. Všeobecné typové schválenie

Deutsches Institut für Bautechnik DIBt. (2018). *Stahlverbundträger mit Verbunddübelleisten in Klothoiden- und Puzzleform*, Z-26.4-56

7. Článok v časopise

Lorenc, W. - Kožuch, M. - Rowiński, S.: The behaviour of puzzle-shaped composite dowels — Part II: Theoretical investigations. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 101, 2014, pp 500 – 518.

Anton Sivčák¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: 3

BETÓNOVÉ DOSKY S NEKOVOVOU VÝSTUŽOU SPRIAHNUTÉ S NADBETÓNOVANOU MOSTOVKOVOU DOSKOU

CONCRETE SLABS WITH NON-METALLIC REINFORCEMENT COUPLED WITH DECK SLAB

Article deals with the use of nonmetallic reinforcement (glass fibers) in slender concrete slabs which are employed as a lost formwork for load-bearing construction. Slender concrete slabs with nonmetallic reinforcement are designed with modify on its surface from the top side of its surface to interface slabs to concrete part of load-bearing construction. This causes interface cross-section of higher hardness. Benefit of the method is the formwork that becomes a part of load-bearing construction. Another significant advantage is a role of sufficient concrete cover for metallic reinforcement of load-bearing construction specially in aggressive environment with the higher risk of reinforcement corrosion. Our task is to prevent lifetime shortening of concrete load components (bridge deck) in aggressive environment. The capacity of ultimate limited state and the capacity of service limited state may decrease drastically in time due to metallic reinforcement corrosion even in case of tiny prior local defects of reinforcement. Application of glass fiber nonmetallic reinforcement to formwork slabs protects the bridge deck against corrosion perfectly. Creation of this special effective interface design on concrete slab surface influence the bearing capacity and the transfer of load to supports, what is the topic for further experimental research.

1. Úvod

Predmetom tohto článku sú subtílné betónové dosky. Mostovkovej doske, ktorá je vystužená oceľovou betonárskou výstužou, vytvoria plnohodnotnú ochranu voči korózií a predĺžia jej životnosť a prevádzkovú dobu bez výrazných sanačných úprav. Špeciálnou úpravou horného povrchu subtílnych dosiek o ktorej pojednáva jedna z nasledujúcich kapitol tohto článku, dosiahneme spriahnutie, ktorým máme zámer docieľiť, aby tento prvok spolupôsobil s mostovkovou ako jeden spriahnutý celok. Na preberaní ťahového napätia na spodnom povrchu sa bude podieľať GFRP výstuž a výstuž mostovky.

2. Realizácia subtílnych betónových dosiek

Realizácia II. série prebehla 26.marca 2019 v prefabrikárni Sered'. I série mala pri realizácii II. veľkú referenčnú hodnotu, pretože práve na základe experimentálnych výsledkov a analytických zistení I. série bola druhá séria vyhotovená. Prvky boli betónované v obrátenej polohe. Na dno predpripraveného debnenia bola uložená naolejovaná PVC matrica, ktorá zabezpečila prebratie navrhutej povrchovej úpravy na horný povrch betónu. Pôsobenie vlastnej tieže čerstvej betónovej

¹ Anton, Sivčák, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra betónových konštrukcií a mostov Radlinského 11, blok A, 4. posch., 810 05 Bratislava 15

zmesi bolo prínosom pre prebratie tvaru úpravy povrchu prvku počas betonáže a tuhnutia betónu. Ďalším dôvodom obrátenej polohy prvku počas betonáže bola nízka hodnota objemovej tiaže GFRP a potencionálna možnosť vyplávania a zmeny polohy prúta v priereze. Vystuž bola voči tomuto javu aj dodatočne zabezpečená.



Obrázok 1: Pohľad do debnenia pre subtílné betónové dosky (prefa Sered' – STRABAG)



Obrázok 2: Expedícia prefa Sered' - STRABAG

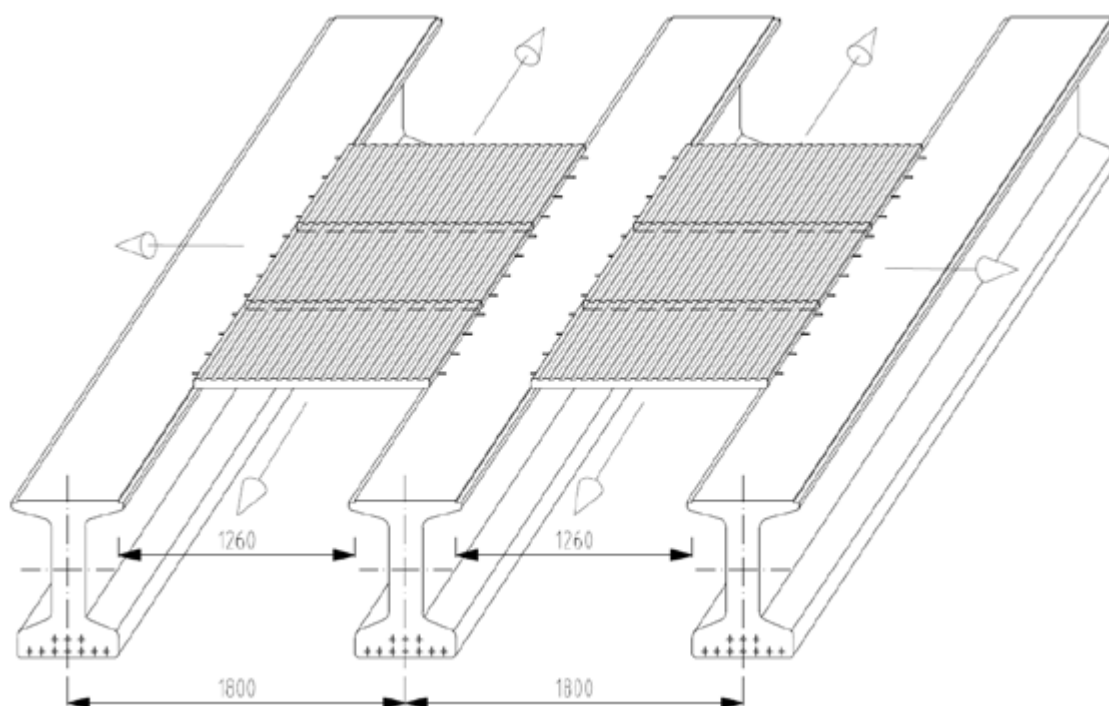
3. Nadbetónovanie mostovkovej dosky

Pre vytvorenie spriahnutého nosného prvku ako celku bude zrealizovaná mostovková doska, resp. nadbetónávka priamo na upravený povrch už vytvorených subtílnych dosiek s GFRP výstužou. Mostovka je charakterizovaná ako plošný nosný prvok, ktorý tvorí hornú stavbu mostnej konštrukcie. Hrúbka mostovkovej dosky spojite uloženej na predpäté hlavné nosníky významne ovplyvňuje nielen hodnotu zaťaženia z vlastnej tiaže, čo má vplyv z globálneho hľadiska na napätia celej mostnej konštrukcie a napätie v základovej škáre, z ktorého vychádza návrh základovej konštrukcie. Vplyv geometrických (hrúbka) a materiálových (pevnosť) vlastností mostovkovej dosky sa ďalej zohľadňuje aj pri návrhu hlavných nosníkov a riešení samotného predpätia. Hrúbka mostovkovej dosky a jej materiálové vlastnosti taktiež ovplyvňujú únavovú odolnosť. Tieto a ďalšie možné nespomenuté poznámky / fakty môžu významne ovplyvniť výstupy návrhov ďalších nosných prvkov mostnej konštrukcie, čo by viedlo k ich samotným zmenám. Vzhľadom na to, že zmeny by pôsobili

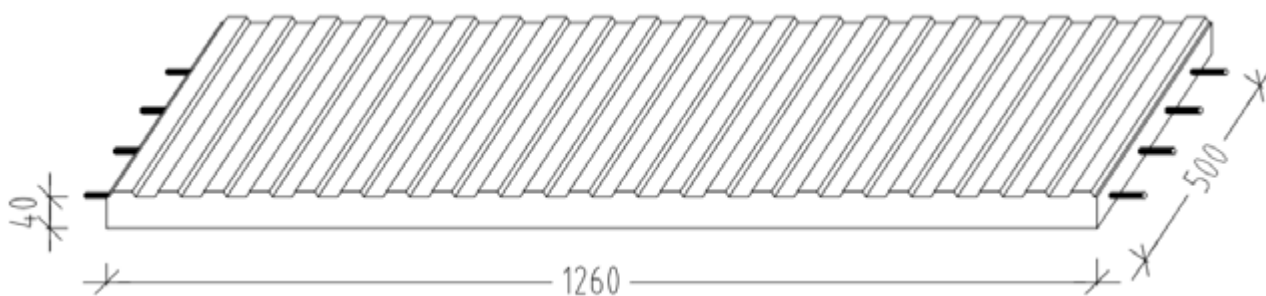
ako nežiaduci jav, bude snaha zachovať hrúbku mostovkovej dosky, resp. nadbetónovanej vrstvy v štandardne zaužívaných hrúbkach pre mostné konštrukcie.

Štandardná hrúbka mostovkovej dosky sa navrhuje v hodnotách od cca. 180 mm do 220 mm. Vzhľadom na spomenuté, no aj ďalšie fakty, hodnotu hrúbky zachováme aj v našom experimentálnom programe s hodnotou 220 mm, aby sa predišlo zmenám v návrhových postupoch ostatných nosných prvkov mostnej konštrukcie. Kvalita betónu nadbetónovanej mostovkovej dosky bude C35/45 vystužená oceľovou výstužou priemeru 16 mm v rastri po 100 mm.

Návrh vystuženia, geometrických a materiálových údajov vychádza z výpočtových postupov na medzné stavy únosnosti samotnej nadbetónovky. Výpočet vnútorných síl vychádzal z teoretického rozpätia 1,2m pri prostom podopretí a boli uvažované následne spomenuté zaťaženia.



Obrázok 3: Schéma ukladania betónových dosiek pred armovaním a betonážou mostovky.



Obrázok 4: Subtilna Betónová doska II.série.

4. Statické a dynamické zaťaženia

Zaťažením konštrukcie rozumieme niečo, čoho dôsledkom je zmena napätosti konštrukcie. Zaťaženia sa delia na priame zaťaženia, ktoré sa majú tendenciu prejavovať formou spojitých alebo sústredených síl priamo pôsobiacich na konštrukciu. Priamym zaťažením je napr. vlastná tiaž konštrukcie, tiaž nenosných prvkov, zemný tlak, tlak vetra, vody, predpätie a pod. Druhou skupinou sú nepriame zaťaženia, ktoré vznikajú obmedzením vynútených pretvorení. Medzi nepriame zaťaženia radíme zmenu teploty, pokles podpier alebo napríklad zmrašťovanie betónu.

5. Statické zaťaženia pôsobiace na prvok

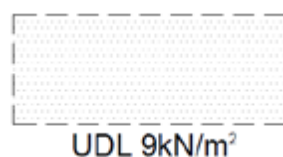
Za reprezentatívnu hodnotu vlastnej tiaže spriahnutého prvku uvažujeme strednú hodnotu danú z nominálnych rozmerov spriahnutého prvku a strednej hodnoty objemovej tiaže betónu. Počítali sme s hodnotou objemovej tiaže betónu 25kN/m^3 . Pri uvážení geometrických rozmerov spriahnutého prvku $500\text{ mm} \times 1\,260\text{ mm} \times (40\text{ mm} + 220\text{ mm})$ a uvažovanej objemovej hmotnosti je hodnota zaťaženia pri prostom podopretí $3,34\text{kN/m}$. Vlastnú tiaž radíme medzi stále zaťaženia.

Ďalším stálym zaťažením, ktoré je bezprostredne potrebné uvážiť vo výpočte je vlastná tiaž pojazdných vrstiev uvažovaných teoretickej hrúbky 100mm a objemovej hmotnosti asfaltu 25kN/m^3 . Vzhľadom k vzniku možných nepresností hrúbky asfaltovej vrstvy počas realizácie vozovky a taktiež jej následnými opravami a s nimi spojené nahromadenie materiálu je vo výpočte uvážený aj opravný súčiniteľ o hodnote $1,4$.

6. Premenné zaťaženia pôsobiace na prvok

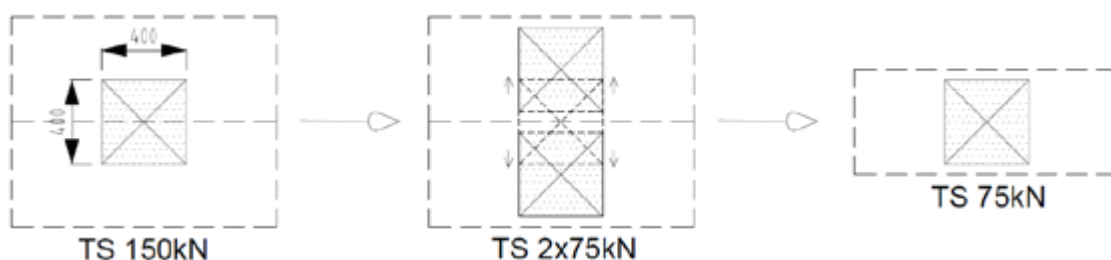
Zaťaženia spôsobené dopravou na cestách pozostávajú z osobných nákladných a špeciálnych vozidiel, ktoré spôsobujú zvislé, vodorovné, statické a dynamické sily. Účinky zaťažení z dopravy a chodcov sa v bežných návrhových postupoch uvažujú využitím zaťažovacích modelov. Na spriahnutý experimentálny prvok budú pôsobiť premenné zaťaženia od dopravy. Tieto zaťaženia treba uvážiť aj počas statického alebo dynamického zaťažovania počas experimentu.

Prvým premenným zaťažením uváženým na experimentálnom prvku bude zaťaženie UDL zaťažovacieho modelu. Hodnota zaťaženia bude 9kN/m^2 na celej ploche experimentálneho prvku $1260\text{ mm} \times 500\text{ mm}$.



Obrázok 4: Uvažované plošné zaťaženie UDL na celej ploche prvku.

Druhým premenným zaťažením bude TS (Tandem system) reprezentujúci pôsobenie zaťaženia kola automobilu na kontaktnej ploche $0,4\text{m} \times 0,4\text{m}$. Východzí je prvý zaťažovací model. Pre experiment vychádzame z hodnoty 150kN TS, uloženej na spriahnutú mostovku práve na stred línie dvoch susediacich subtlínych dosiek podľa nasledujúceho obrázku. Vzhľadom na prerozdelenie sily TS budeme experimentálny prvok zaťažovať silou 75 kN .



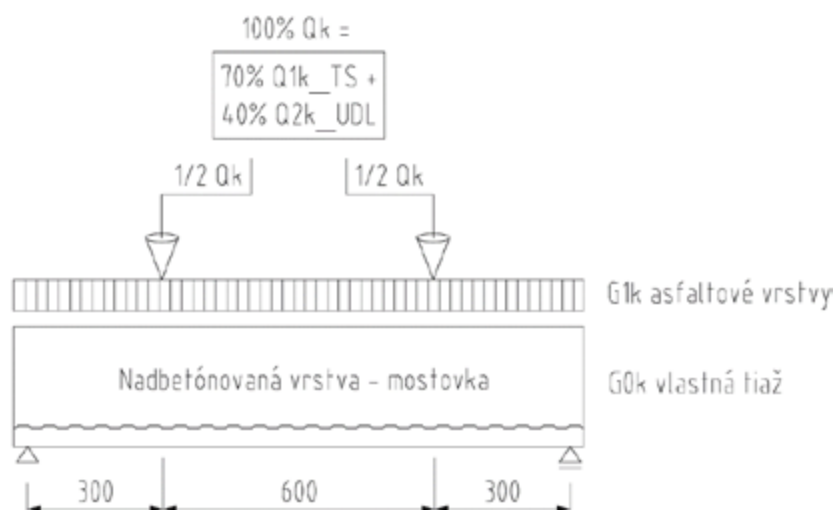
Obrázok 5: Uvažované zaťaženie TS na ploche 400x400mm.

7. Dynamické zaťažovanie spriahnutého prvku.

Jedným z našich cieľov experimentálneho bádania je overiť spoľahlivosť spriahnutia subtlínej dosky a nadbetónovanej mostovky, ktoré bolo zabezpečené vytvorením zazubenia na hornom povrchu subtlínej dosky. Aby sme overili spoľahlivosť spriahnutia a vznik poklzu v stykovej ploche musíme vystaviť experimentálny prvok taktiež dynamickému zaťaženiu. Zložky stálych zaťažení, ako sú vlastná tiaž a vrstvy vozovky, budú počas dynamického zaťažovania pôsobiť na spriahnutý prvok permanentne.

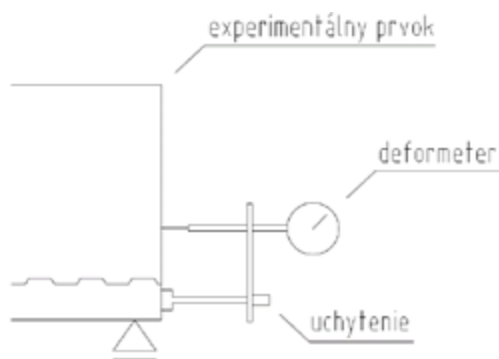
Práve premenné zaťaženia od dopravy budú príčinou vzniku dynamických pulzov, ktorých pôsobením môže dôjsť k únavovému zlyhaniu, resp. vzniku poklzu medzi vrstvami. Z toho dôvodu bude dynamické zaťaženie počas experimentu v intervale od úrovne charakteristického zaťaženia stálych zaťažení po úroveň charakteristického zaťaženia 70-tich percent TS + 40-tich percent UDL vrátane pôvodného charakteristického zaťaženia od stálych zaťažení, čo tvorí amplitúdu cyklu.

Priebeh experimentálnej skúšky je naplánovaný zrealizovať v centrálnych laboratóriách Slovenskej technickej univerzity v Trnávke. Toto laboratórium disponuje mechanizmom, ktoré umožňuje dynamické zaťažovanie, počas ktorého je možné čo najspoľahlivejšie odsledovať súčinnosť betónových vrstiev betónovaných v rozličnom čase, teda odolnosť spriahnutia, čo je našim cieľom. Počas experimentu bude experimentálny prvok spriahnutých vrstiev proste uložený. Skúška bude prebiehať štvorbodovo.



Obrázok 6: Štvorbodová skúška s príslušné stále statické a premenné dynamické charakteristické zaťaženia.

Poklz, ktorý môže počas dynamických cyklov z premenného zaťaženia potencióálne vzniknúť, budeme sledovať pomocou hodnôt z deformetrov, uchytených na lícach experimentálneho prvku. Vzhľadom na priebeh priečných síl je najpravdepodobnejšie, že dôjde k poklzu na koncoch, pretože v rovine styku bude najväčšie šmykové napätie. Ďalšími sledovanými parametrami budú pretvorenia na povrchu betónu a výstuže. Taktiež bude sledovaný priehyb v strede rozpätia počas zaťažovania.



Obrázok 7: Spôsob sledovania potencióálne možného poklzu počas experimentu.

8. Záver.

Preukázanie priaznivých výsledkov pri meraniach poklzu, pretvorení aplikovaných materiálov a priehybu spriahnutého prvku atď. povedie k diskusiám, v ktorých sa bude o využití takéhoto druhu prvku polemizovať nielen v teoretickej sfére.

Zámerom bude dosiahnuť výsledky a zistenia, vďaka ktorým bude uplatnenie tohto druhu spriahnutej konštrukcie v praxi spoľahlivým a funkčným riešením, ktoré predĺži prevádzkovú životnosť konštrukcie, zabezpečí spoľahlivú kontrolu stavu konštrukcie počas prevádzky a umožní využitie nových druhov materiálov výstuže vo svete.

Literatúra

[1] BENKO, V., BILČÍK, J., a kolektív.: Manuálu na navrhovanie GFRP výstuže do betónových konštrukcií. In *Manuál na navrhovanie GFRP výstuže do betónových konštrukcií*. 1. vyd. Bratislava : Slovenská komora stavebných inžinierov, 2015, ISBN 978-80-8076-117-2.

[2] PFEIFFER, U.: (2014) *Program: Analysis of reinforced Concrete Structures, TUHH, Version 2.90.*

[4] ACI 440.1R-06: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, *March 2015*.

[5] fib Bulletin no. 40, „FRP reinforcement in RC structures“, *International federation for structural concrete, 2007, Lausanne, Switzerland, ISBN 978-3-433-03061-5*.

[6] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-1.6-238: Bewehrungsstab Schöck ComBAR aus glasfaserverstärktem Kunststoff. *Juni 2014, 18S*.

[7] BENKO, V. ; VALAŠÍK, A.: Manuál na navrhovanie GFRP výstuže do betónových konštrukcií. In *Sanácia betónových konštrukcií : zborník príspevkov z 9. seminára. Smolenice, SR, 10. - 11. 12. 2015*. Brno : Tribun EU, 2015, S. 137-140. ISBN 978-80-263-0882-9.

Simona Šarvaicová¹

Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 2. ročník

ANALÝZA ŠMYKOVÉHO TOKU V OBLASTI OKOLO VNÚTORNÝCH STĹPOV A OKRAJOV STIEN

THE ANALYSIS OF A SHEAR FLOW IN THE AREA AROUND THE INTERNAL COLUMNS AND THE EDGE OF WALLS

Abstract

This paper deals with both linear and non-linear analysis of shear forces distribution in the area near the supports of the flat slabs. The physical basis for determining reduced control perimeters is based on the shear force concentration near the support. With a cross-section ratio of $c_{\max} / c_{\min} > 3$ ($c_{\max} > 3d$), the shear stresses are concentrated near the column or wall corners. As a consequence of this phenomenon, it is necessary to reduce the control perimeter when evaluating the punching shear resistance. The subject of this analysis are the fragments of the flat slabs with a thickness of 200 mm supported by a column or by the edge of a wall. The model used for non-linear evaluation was calibrated based on the results from the experiment. Based on thus evaluated punching shear resistances, the theoretical reduced control perimeter length was determined and subsequently compared to design model Eurocode 2.

Kľúčové slová

Lokálne podopreté dosky, šmyková odolnosť, redukcia dĺžky kontrolného obvodu, šmykový tok.

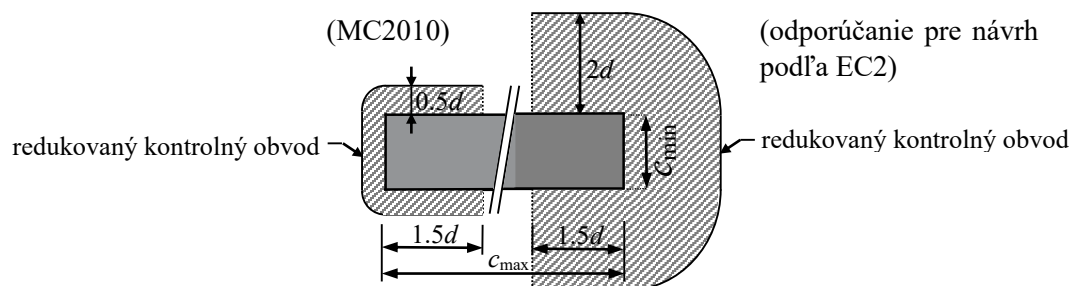
1. Úvod

Článok sa zaoberá analýzou fragmentu dosky v oblasti pri vnútorných stĺpoch a stenách, ktorý je zaťažený rôznymi zaťažovacími podmienkami. Šmykový tok v základnom kontrolnom obvode okolo stĺpov s kruhovým alebo štvorcovým prierezom je charakteristický rovnomerným rozložením šmykovej sily. Šmykové namáhanie v prípade stĺpov s výrazne odlišným pomerom strán a v prípade stien má odlišný charakter. Väčšina zaťaženia sa sústreďuje v oblasti rohov stĺpa alebo steny, a preto je potrebné kontrolný obvod redukovať. V tomto prípade zaťažovacie podmienky ovplyvňujú prerozdelenie ohybových momentov s čím súvisí otváranie šmykových trhlin, ktoré následne vedú k porušeniu prekročením šmykovej odolnosti.

Podľa Model Code 2010 (MC2010) [1] sa základný kontrolný obvod redukuje podľa **Obr. 1**. Redukcia spočíva v skrátaní obvodu na vzdialenosť $1,5d$ od rohov podpory pozdĺž dlhšej strany stĺpa c_{\max} , respektíve pozdĺž dĺžky steny.

Cieľom tohto výskumu je numerická lineárna a nelineárna analýza šmykovej odolnosti stropnej dosky okolo konca steny so zhodnotením pomeru skutočného reálneho kontrolného obvodu ku vypočítanému podľa výpočtového modelu EC2 [2]. Ako bolo nedávno zistené [3], redukcia dĺžky kontrolného obvodu sa nepreukázala ani v prípade výrazne obdĺžnikového stĺpa s pomerom strán priečného rezu $c_{\max} / c_{\min} = 7$. Ako dodatok tohto výskumu je spravená nová analýza redukcie dĺžky kontrolného obvodu okolo konca stenovej podpory.

¹ Ing. Simona Šarvaicová, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava



Obrázok 1: Redukcia dĺžky kontrolného obvodu podľa EC2 a MC2010

2. Výpočtový model Eurokód 2

Šmyková odolnosť bezprievlakových stropných dosiek je podmienená niekoľkými faktormi. Je to najmä zaklínenie zŕn kameniva v šmykovej trhline, tlačení betón pod neutrálnou osou a hlavná ohybová výstuž. Tieto fakty sú zohľadnené v empirickom vzorci, ktorý stanovuje šmykovú odolnosť dosky podľa EC2.

$$V_{Rd,c} = \frac{C_{Rk,c}}{\gamma_c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} u_1 d \quad (1)$$

kde:

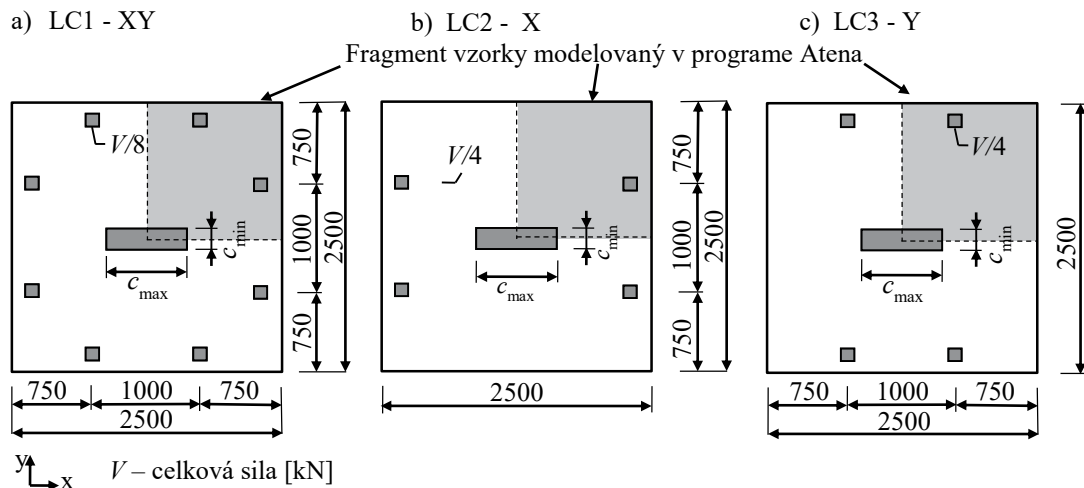
- $C_{Rk,c}$ - empirický faktor [MPa];
- γ_c - súčiniteľ spoľahlivosti, $\gamma_c = 1.5$ [-];
- k - súčiniteľ prierezu, $k = 1 + (200[\text{mm}]/d)^{0.5} \leq 2.0$ [-];
- ρ_1 - stupeň vystuženia, $\rho = (\rho_x \rho_y)^{0.5}$ [-];
- f_{ck} - charakteristická pevnosť betónu v tlaku [MPa];
- u_1 - základný kontrolný obvod vo vzdialenosti $2d$ od líca podpery [mm];
- d - účinná výška [mm].

3. Zaťažovacie podmienky/stavy

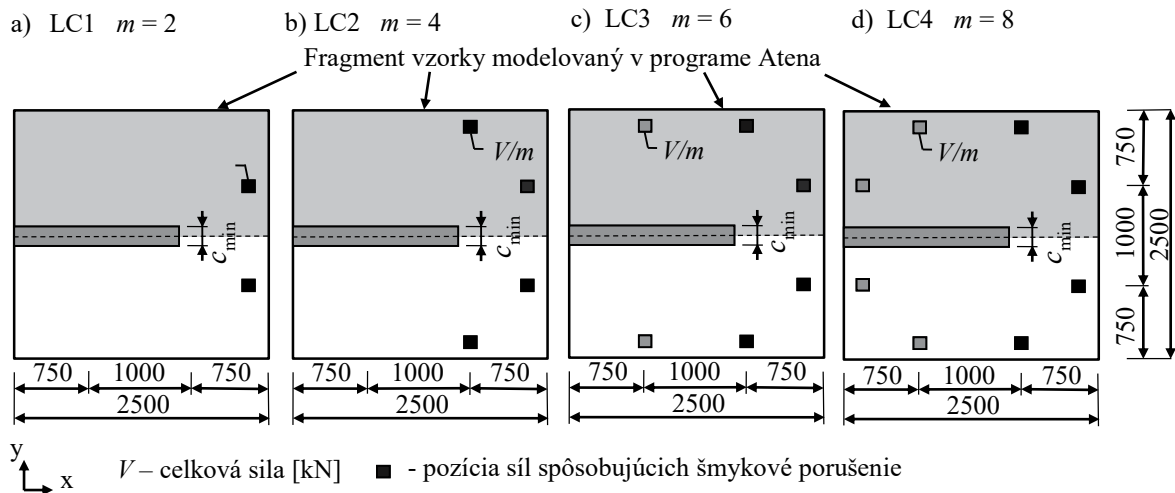
V prípade vzoriek podporených stĺpov boli použité tri zaťažovacie stavy, znázornené na **Obr. 2**. Prvý zaťažovací stav prezentuje rovnomerné rozloženie síl. Ostatné dva reprezentujú prevládajúce zaťaženie v smere osi X a Y.

Vzorky podporené okrajom steny boli zaťažené štyrmi rôznymi zaťažovacími podmienkami (LC1 - LC4). Tieto zaťažovacie stavy predstavujú rôzne rozloženie zaťaženia simulujúce rôzne dĺžky prilahlých polí. Prvý (LC1) predstavuje takmer jednosmerné zaťaženie (**Obr. 3a**). Ďalšie dva typy (LC2 a LC3) zobrazené na **Obr. 3b,c** predstavujú postupné zväčšovanie zaťaženia prichádzajúceho zo smeru osi Y.

Posledný (LC4) predstavuje zaťaženie rovnomerne rozložené okolo celej vzorky, rovnako ako v prípade bodovej stĺpovej podpory (**Obr. 2a**). Spolu sa na celú vzorku použilo osem ekvivalentných síl, ako je znázornené na **Obr. 3d**.



Obrázok 2: Zaťažovacie podmienky LC1-LC3 pre vzorky podpreté stĺpom: a) rovnomerné zaťaženie b) zaťaženie v smere X c) zaťaženie v smere Y



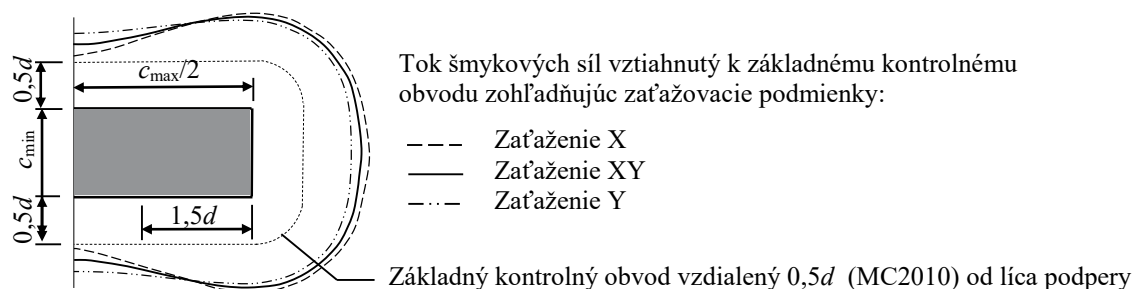
Obrázok 3: Zaťažovacie podmienky LC1-LC4 pre vzorky podpreté koncom steny

Sily znázornené bledšou farbou v zaťažovacích schémach **Obr. 3 c,d** sú v pozícii pred okrajom steny, čím by teoreticky nemali prispievať ku dvojsmernému šmykovému namáhaniu - pretlačeniu okolo okraja steny. Preto tieto sily nie sú vo vyhodnotení započítané do šmykových odolností vzoriek.

4. Lineárna analýza – redukcia dĺžky základného kontrolného obvodu

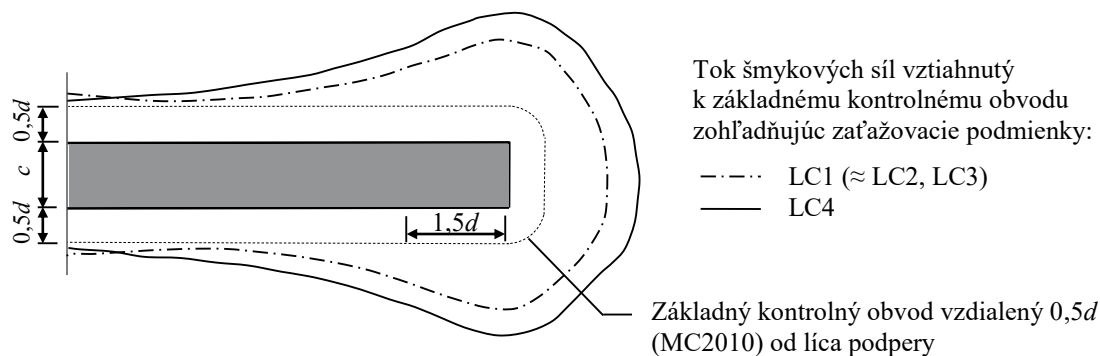
Redukcia dĺžky základného kontrolného obvodu okolo stĺpov s obdĺžnikovým prierezom je založená na koncentrácii šmykových napätí, ktorú možno analyzovať podľa metódy konečných prvkov použitím 2D elementov.

Stĺp, resp. stena je modelovaná ako tuhá plošná podpera, ktorá prenáša len tlak. Koncentrácia šmykových napätí je zobrazená na **Obr. 4**, kde jednotlivé krivky reprezentujú tok šmykových síl podľa použitých zaťažovacích podmienok. Priebeh šmykového toku je vztiahnutý k rezu, ktorý kopíruje základný kontrolný obvod vzdialený $0,5d$ od líca podpery (podľa MC2010). Druhou možnosťou zobrazovania koncentrácie šmykových síl je skúmanie kontaktných napätí v stĺpovej podpere [4].



Obrázok 4: Rozloženie šmykových síl okolo základného kontrolného obvodu v prípade podopretia stropnej dosky stĺpom

Na Obr. 5 možno vidieť tok šmykových síl v prípade stropnej dosky podpretej okrajom steny. Zaťažovacie stavy LC1-LC3 majú veľmi podobný priebeh šmykového toku. V prípade zaťažovacieho stavu LC4, kedy je šmykové namáhanie spôsobené len dvojicou síl podľa Obr. 3d, je koncentrácia šmykových síl výraznejšia.



Obrázok 5: Rozloženie šmykových síl okolo základného kontrolného obvodu v prípade podopretia stropnej dosky stenou

5. Nelineárna analýza (NLA)

Nelineárna analýza bola urobená vo výpočtovom programe Atena [5]. Podľa lineárnej analýzy dochádza k čiastočnému poklesu šmykových napätí vo vzdialenosti $1,5d$ od líca podpery. Avšak, v nelineárnej analýze sa redukcia dĺžky kontrolného obvodu nepreukázala ani v prípade výrazne obdĺžnikového stĺpa s pomerom strán prierehového rezu $c_{\max} / c_{\min} = 7$. Príčinou tohto javu je redistribúcia napätí okolo podpery. Kalibrácia modelov bola urobená na základe realizovaných experimentov [6].

4.1 Geometria a materiál vzoriek

Predmetom tejto analýzy sú štyri fragmenty stropnej dosky s hrúbkou $0,2$ m. Skúšobné vzorky predstavujú experimentálnu laboratórnu kampaň, ktorá je naplánovaná v blízkej budúcnosti. Všetky vzorky dosiek majú rovnaké rozmery ($2,5 \times 2,5$ m). Taktiež pre všetky vzorky bolo použité rovnaké vystuženie ($\rho_1 = 1,26$ %) s použitím viazanej výstuže s priemerom 16 mm rozmiestnených rovnomerne po 100 mm v oboch smeroch. Vzorky nie sú vystužené šmykovou výstužou. Účinná výška (d) je 159 mm, rovnako pre všetky vzorky. Spodný povrch dosky je vystužený výstužou s priemerom 10 mm po 200 mm.

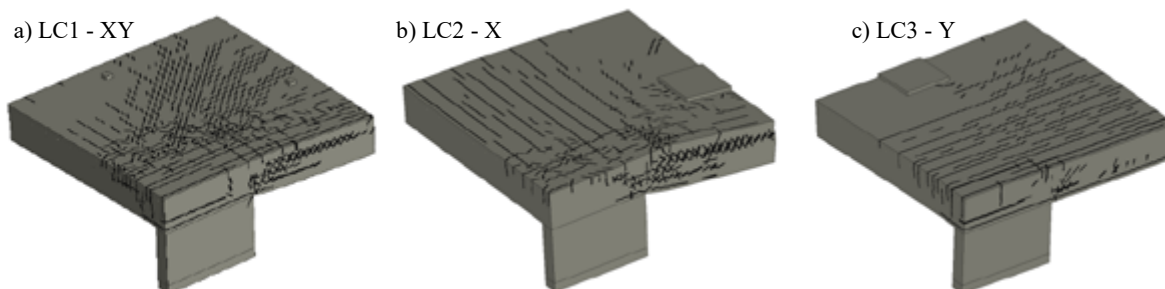
V analýze sa uvažuje so vzorkami z betónu s valcovou pevnosťou $f_{cm} = 33$ MPa a maximálnym zrnom kameniva $d_{g,max} = 16$ mm. Fragmenty dosky sú vystužené oceľovou výstužou s medzou klzu $f_{ym} = 550$ MPa.

6. Výsledky analýzy

Model EC2 nezohľadňuje vplyv rozloženia zaťaženia (rozpätí polí) okolo podpier stropnej dosky, len ich nesymetrickosť cez nevyrovnané momenty. Avšak v tejto analýze sa preukázal vplyv rozloženia zaťaženia a to najmä pri vzorkách so stĺpmi s $c_{max} / c_{min} \geq 5$.

Všetky analyzované vzorky boli zaťažené až do ich porušenia. V prípade LC1 – XY, teda rovnomerného zaťažovania vzorky, sa nelineárnym výpočtom nepreukázala redukcia dĺžky kontrolného obvodu. Vo výstuži nedošlo k dosiahnutiu medze klzu a na všetkých vzorkách je výrazne pozorovateľný rozvoj šmykovej trhliny, z čoho možno usúdiť, že všetky vzorky zlyhali následkom prekročenia šmykovej odolnosti.

Na Obr. 6 je znázornená vzorka so stĺpom $c_{max} / c_{min} = 7$ pri rôznych zaťažovacích podmienkach. V prvých dvoch prípadoch je jasne pozorovateľná šmyková trhlinka, v poslednom ide zase o ohybové trhlinky vedúce k dosiahnutiu ohybovej odolnosti.



Obrázok 6: Deformácia a trhliny v betóne tesne pred porušením vzorky podopretej stĺpom s pomerom strán $c_{max} / c_{min} = 7$

V Tab. 1 sú zhrnuté výsledky z analýzy vzoriek podopretých stĺpom. Jednotlivé šmykové odolnosti boli vypočítané pre rôzne rozmery stĺpa ($1 \leq c_{max} / c_{min} \leq 7$) so zaťažovacími podmienkami podľa Obr. 2.

Tabuľka 1: Výsledky z nelineárnej analýzy (Atena) pre vzorky podopreté stĺpom

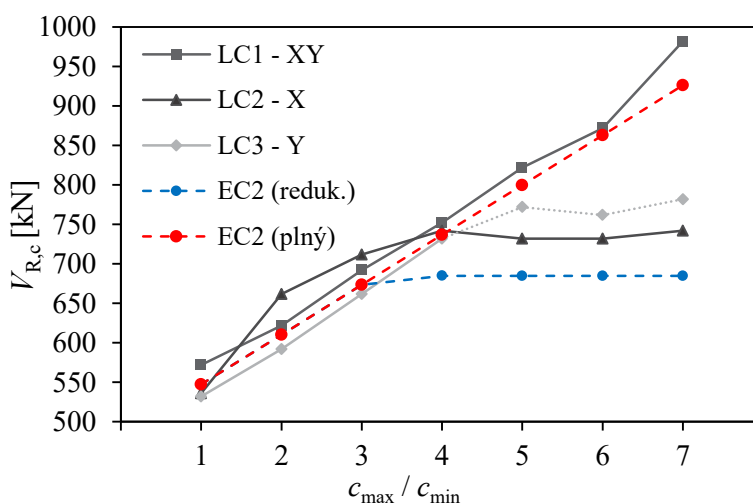
| Rozmery stĺpa [m] | | V_{ATENA} [kN] / v_{ATENA} [kN/m] | | |
|-------------------|-----------|---------------------------------------|-----------|-----------|
| c_{min} | c_{max} | LC1 - XY | LC2 - X | LC3 - Y |
| 0,15 | 0,15 | 572 / 220 | 536 / 206 | 532 / 205 |
| | 0,30 | 622 / 215 | 662 / 228 | 592 / 204 |
| | 0,45 | 692 / 216 | 712 / 223 | 662 / 207 |
| | 0,60 | 752 / 215 | 742 / 212 | 732 / 209 |
| | 0,75 | 822 / 216 | 732 / 193 | 772* / - |
| | 0,90 | 872 / 213 | 732 / 179 | 762* / - |
| | 1,05 | 982 / 223 | 742 / 169 | 782* / - |

V_{ATENA} – šmyková odolnosť [kN]
 v_{ATENA} – šmykový tok, $v_{ATENA} = V_{ATENA} / u_1$ [kN/m]
 Poznámka: * porušenie ohybom.

V prípade, kedy sa vzorka zaťažovala v smere kolmom na c_{max} (LC3 – Y), mali rozmery stĺpa vplyv aj na typ porušenia dosky. Vo vzorkách s pomerom $c_{max} / c_{min} \geq 5$ začala plastizovať výstuž pred vznikom šmykového kužeľa a vzorky následne zlyhali ohybom.

Redukciu dĺžky kontrolného obvodu sa podarilo overiť v prípade zaťažovania vzorky kolmo na rozmer c_{min} (LC2 -X). Výsledky jednotlivých zaťažovacích stavov sú znázornené na **Obr. 8**.

V Tab. 2 sú uvedené aj šmykové toky $v_{ATENA} = V_{ATENA} / u_1$ [kN/m], za predpokladu uvaženia plného kontrolného obvodu. Hodnoty šmykového toku v_{ATENA} pri porušení vzorky sa do rozmeru stĺpa $c_{max} = 0,6$ m pohybujú okolo hodnoty 213 kN/m, čo je približne aj teoretická hodnota podľa EC2 $v_{Rc} = 220$ kN/m. Výsledky v tomto prípade teda nepreukazujú fyzikálnu redukciu dĺžky kontrolného obvodu. Naopak v prípade LC2 – X od rozmeru stĺpa $c_{max} = 0,75$ m sa šmykový tok znižuje postupne až na hodnotu 169 kN/m, čo je dôsledkom koncentrácie šmykového namáhania v rohoch stĺpa, a teda potreby redukcie dĺžky kontrolného obvodu.



Obrázok 7: Závislosť sily pri porušení od pomeru c_{max} / c_{min}

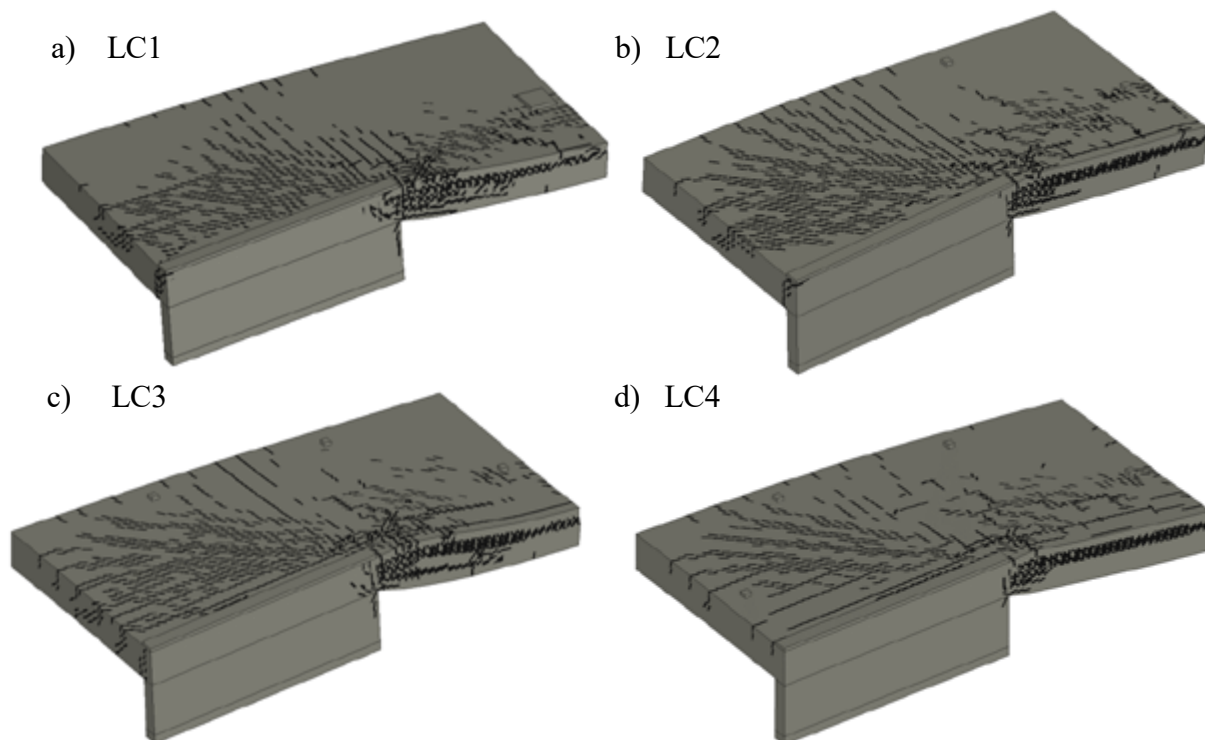
Ako možno vidieť na **Obr. 8**, vo všetkých prípadoch dosiek podopretých okrajom steny je možno vidieť rozvoj šmykovej trhliny, z čoho sa dá usúdiť, že všetky vzorky zlyhali na porušenie šmykom. Zobrazené sú trhliny s minimálnou šírkou 0,1 mm.

Šmyková odolnosť vzoriek bola stanovená s uvažovaním, že šmykové porušenie spôsobujú len sily vyznačené na **Obr. 3** tmavšou farbou pôsobiacimi za okrajom steny. Na základe výsledkov z NLA (**Tab. 2**) možno konštatovať, že šmyková odolnosť vzoriek podopretých stenou nezávisí od zaťažovacích podmienok a ich priemerná hodnota je 268 kN.

Zo šmykovej odolnosti získanej výpočtom z Atény bol následne odvodený skrátenej kontrolný obvod a porovnaný s odporúčaným redukovaným kontrolným obvodom podľa EC2. Pomer výsledkov z EC2 a NLA je uvedený v poslednom stĺpci nasledujúcej tabuľky.

Tabuľka 2: Výsledky z nelineárnej analýzy (Atena) pre vzorky podopreté stenou

| Zaťažovací stav LC | Účinná výška d | Šmyková odolnosť V_{ATENA} | Redukovaný kontrolný obvod (Atena) $u_{1,real}$ | Redukovaný kontrolný obvod (EC2) $u_{1,red}$ | Pomer $u_{1,real} / u_{1,red}$ |
|--------------------|------------------|------------------------------|---|--|--------------------------------|
| | [m] | | [m] | [m] | |
| LC1 | 0,159 | 288 | 1,33 | 1,63 | 1,22 |
| LC2 | | 250 | 1,16 | | 1,41 |
| LC3 | | 265 | 1,23 | | 1,33 |
| LC4 | | 270 | 1,25 | | 1,30 |



Obrázok 8: Deformácia a trhliny tesne pred porušením vzorky podporetej okrajom steny

7. Záver

Cieľom tejto práce bolo odvodenie skutočnej dĺžky redukovaného kontrolného obvodu zo šmykovej odolnosti vzorky získanej z nelineárneho výpočtu programu Atena. Na základe výsledkov analýzy boli vyvedené nasledovné závery:

1. V prípade podpretia stropnej dosky výrazne obdĺžnikovým stĺpom majú zaťažovacie podmienky vplyv na veľkosť šmykovej odolnosti a v prípade LC3 -Y aj na typ porušenia vzorky.
2. Pri vzorkách podporených stĺpom s pomerom strán priečného rezu $c_{\max} / c_{\min} > 3d$ sa v nelineárnej analýze preukázala redukcia dĺžky kontrolného obvodu len v prípade zaťažovania podľa LC2 – X (zaťaženie prichádzajúce ku kratšej strane stĺpa).
3. Pri rovnomernom zaťažovaní vzorky podporetej stĺpom sa preukázala podobnosť medzi šmykovou odolnosťou získanou z NLA a výpočtom podľa EC2 s tým, že sa uvažil plný kontrolný obvod.
4. Vplyv zaťažovacích podmienok na veľkosť šmykovej odolnosti pre stropné dosky podporené okrajom steny sa nepreukázal. Z nelineárnej analýzy odvodené čiastočné kontrolné obvody sú kratšie ako predpoklad EC2.

8. 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. VEGA 1/0254/19 „Šmyková odolnosť železobetónových dosiek namáhaných koncentrovaným zaťažením“.

Literatúra

- [1] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (fib).: *Bulletin n. 65/66 Model Code 2010. Final draft (Vol. 1, 2. fib)*. Lausanne, 2012. ISBN 978-3-909386-79-6.
- [2] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION.: *Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings*, London: BSI, 2004. 118 s. ISBN 978-0-580-98289-7.
- [3] ŠARVAICOVÁ, S., BORZOVIČ, V., AUGUSTÍN, T.: The influence of a column shape cross-section on the punching capacity. In *Procedia Engineering*. Vilnius, 2019.
- [4] SAGASETA, J., TASSINARI, L., FERNÁNDEZ RUIZ, M., & MUTTONI, A.: Punching of flat slabs supported on rectangular columns. In *Engineering Structures 77*, Amsterdam: Elsevier Ltd., 2014. s. 17-33. ISSN 0141-0296
- [5] ČERVENKA, V., JENDELE, L., & ČERVENKA, J.: *ATENA program documentation, Part 1, Theory*. Praha: s.n., 2018.
- [6] AUGUSTÍN, T., FILLO, L., HALVONIK, J.: Punching resistance of slab-column connections with openings. In *Structural Concrete*. fib - International Federation for Structural Concrete, 2019.
- [7] HAWKINS, N. M., FALLSEN, H. B., & HINOJOSA, R. C.: Influence of column rectangularity on the behaviour of flat plate structures. In *ACI Special Publication, SP-30(6)*, 1971. s. 127-146.

Róbert Štecák¹

Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 2. ročník

BRIDGE WEIGH-IN-MOTION SYSTÉM

BRIDGE WEIGH-IN-MOTION SYSTEM

Abstract

Nowadays, the traffic is more intensive than in past. This phenomenon has significant effect to transport structures. It could damage the whole construction. Bridges in Slovakia, and whole Europe are from period after WWII. It means that they are over 50-70 years old. Condition of bridges is not so good, it is necessary to take measurements. In 70's was modified classic Weight-in-Motion (WIM) system by Moses algorithm. Bridge Weigh-in-Motion (BWIM) is non-destructive system, that allows to calculate the weight of vehicles. This method is still improving and making efficient as is possible. This article will be about the principles of BWIM system.

Kľúčové slová

Most, meranie, hmotnosť, oceľ, prevencia

Úvod

V súčasnosti je doprava oveľa viac intenzívna ako tomu bolo v minulosti. Tento fenomén má veľký vplyv na dopravné stavby. Nielen poškodenia vozoviek, ale najmä na stav mostných konštrukcií. Mosty ktoré máme na Slovensku ale aj po celej Európe, boli postavené prevažne v období po druhej svetovej vojne a majú aj viac ako 50-70 rokov. Stav mostov v súčasnosti už nie je ako u nových mostov a obzvlášť pri kovových mostoch je ich problémom korózia, či únava materiálu. Je potrebná kontrola konštrukcií a neustály dohľad na dopravu, aby neboli mostné konštrukcie preťažené. V 70-tych rokoch bol modifikovaný systém na váženie hmotností náprav vozidiel Weigh-in-Motion system. Podľa Mosesa [1] bol vytvorený princíp Bridge Weigh-in-Motion(BWIM), ktorý umožnil merania hmotností náprav akýchkoľvek vozidiel, bez nutnosti zásahu do konštrukcie. Časom sa metóda vylepšovala a zefektívňovala. V tomto článku bude venovaná pozornosť metodike princípom BWIM systémom a jej implementovania do neskoršej dizertačnej práce.

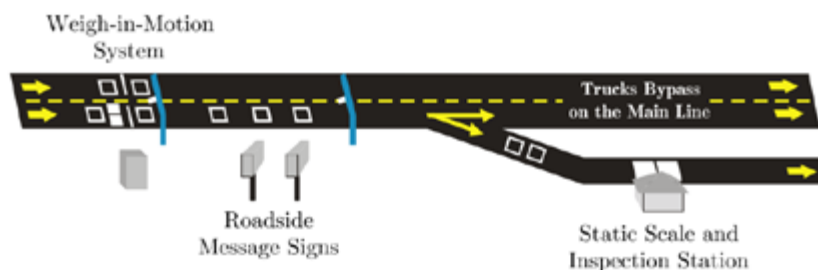
1. Princíp BWIM

Na cestných konštrukciách sa používali už dlhé roky klasické statické váhy na meranie hmotností vozidiel a identifikáciu preťažených vozidiel. Tieto váhy sú ale veľké a vyžadujú si mnoho priestoru.



Obrázok 1. Statické váhy určené na meranie hmotnosti vozidiel [2]

Neskôr bol vytvorený WIM systém, umožňujúci meranie hmotnosti vozidiel bez potreby mať statické, rozmerovo veľké váhy. Tento systém je implementovaný priamo do vozovky, čím si nevyžaduje dodatočný priestor mimo vozovky. Tento systém je používaný dodnes, prevažne v Spojených štátoch amerických. WIM systém je vhodný na použitie na bežné komunikácie, avšak nie na mosty. Implementácia tak veľkého systému je takmer nemožná.



Obrázok 2. Schéma WIM systému spolu s ukázkou WIM senzorov a kalibračnej váhy[2]

V 70-tych rokoch bol vyvinutý Mosesov algoritmus [1], pomocou ktorého bolo možné zistiť hmotnosť vozidla na základe odozvy mosta. Na meranie sú použité tenzometre, vďaka ktorým je možné zistiť pomerné pretvorenie mosta po prejazde vozidla. Algoritmus je založený na fakte, že po prejazde vozidla po moste, vyvolá napätie v konštrukcii, ktoré po spojení s vplyvovou čiarou umožní zistiť hmotnosť vozidla. Výpočet prebieha vždy pre nosník, na ktorom sú osadené tenzometre. Pre výpočet napätia je použitý jednoduchý vzorec.

$$\sigma_j = \frac{M_j}{W_j} \quad (1.1)$$

kde:

$j = 1 \dots G$ (počet nosníkov)

σ_j = napätie v j -tom nosníku

M_j = ohybový moment v j -tom nosníku

W_j = prierezový modul j -teho nosníka

Ohybový moment je teda po úprave:

$$M_j = W_j * \sigma_j = E * W_j * \varepsilon_j \quad (1.2)$$

kde:

E = modul pružnosti mosta

ε_j = pomerné pretvorenie v j -tom nosníku

Celkový moment je teda suma jednotlivých momentov kde dostaneme:

$$M = \sum_j^G M_j = \sum_j^G E * W_j * \varepsilon_j = EW \sum \varepsilon_j \quad (1.3)$$

Prierezový modul a modul pružnosti sú konštanty, takže ich môžeme vybrať pred sumu. Na základe tohto postupu je možné zistiť ohybový moment vyvolaný vozidlom. BWIM je ale reverzný problém, kde poznáme pomerné pretvorenie vyvolané vozidlom a je potrebné zistiť zaťaženie. Pre učenie teoretického ohybového momentu od vozidla (M_k^T) je nasledovný postup:

$$M_k^T = \sum_{i=1}^N A_i * I_{(k-C_i)} \quad (1.4)$$

$$C_i = (L_i * f) / v \quad (1.5)$$

kde:

N = počet náprav vozidla

A_i = hmotnosť nápravy i

I_{k-C_i} = poradnica vplyvovej čiary pre nápravu i v meraní k

C_i = počet meraní vzhľadom na nápravovú vzdialenosť L_i

L_i = vzdialenosť medzi nápravou i a prvou nápravou v metroch (L_1 a teda C_1 sú rovné nule)

f = skenovacia frekvencia v Hz

v = rýchlosť vozidla v m/s

Je potrebné vziať do úvahy aj dynamické účinky, a preto je nutné odstrániť s chybou výpočtu.

Chybová funkcia E umožňuje odfiltrovať dynamickú odozvu mosta:

$$E = \sum_{k=1}^K (M_k^M - M_k^T)^2 \quad (1.6)$$

Kde:

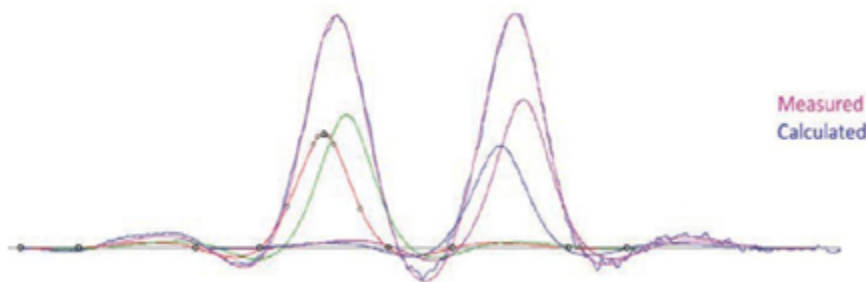
k = číslo skenovania

K = celkový počet skenovaní

M_k^M = nameraný ohybový moment pri k -tom skenovaní

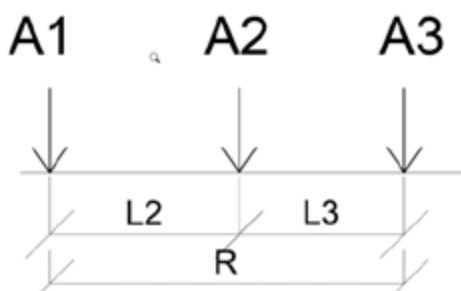
2. Metódy určenia vplyvovej čiary

Najdôležitejšou úlohou pri BWIM systéme je správne určenie vplyvovej čiary. Na základe Mosesovho algoritmu je možné vytvoriť vplyvovú čiaru viacerými spôsobmi. Dôležité je zabezpečiť, aby bola vplyvová čiara čo najpresnejšia.



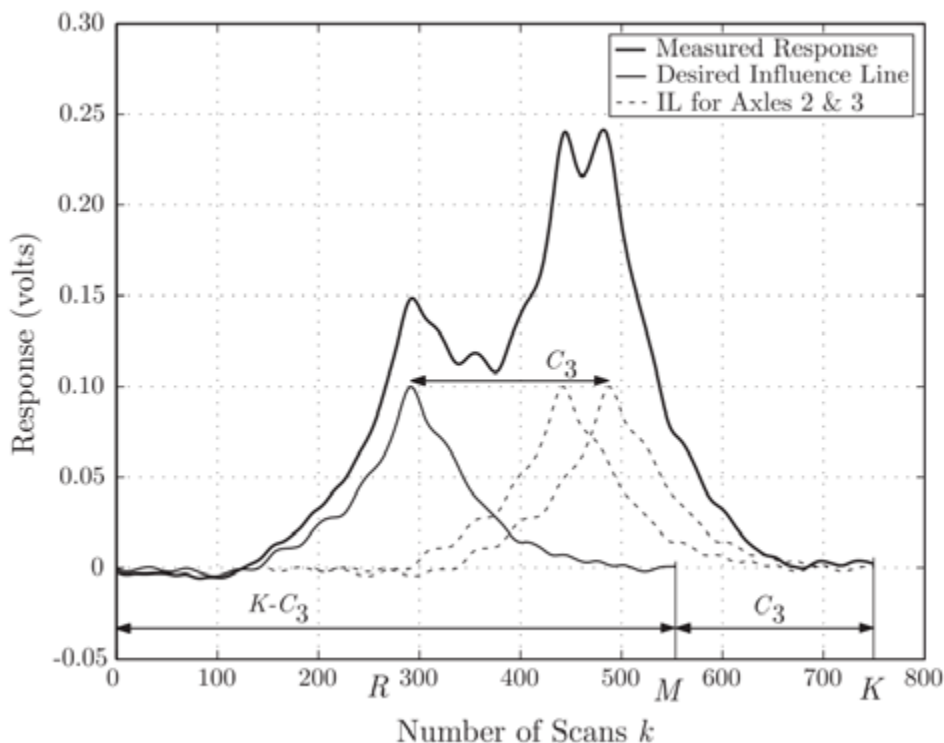
Obrázok 3. Graf znázorňujúci rozdiely pri meranej a vypočítanej vplyvovej čiare v pozdĺžnom smere [3]

Na obrázku 3 je vidieť rozdiel pri určovaní vplyvovej čiary pomocou numerickej metódy a výsledkov získaných z merania. Je teda nutné využiť čo najpresnejšiu metódu. V dizertačnej práci bude použitá Quilligenova metóda matic. Táto metóda minimalizuje chybu a je možné ju použiť na akýkoľvek typ mosta či dopravy. Metóda bude názorne ukázaná na trojnápravovom vozidle, podľa [4].



Obrázok 4. Schéma vozidla

Na začiatok je potrebné kalibračné vozidlo, pri ktorom je potrebné poznať jeho rázvor náprav a hmotnosť každej nápravy. Pri názornej ukážke je ukázané 3 nápravové vozidlo. V obrázku 5 je ukázaná vplyvová čiara po prejení kalibračného vozidla. Po prepočítaní vzdialenosti náprav (1.5) je možné identifikovať nápravy vozidla.



Obrázok 5. Meraná odozva 3 nápravového vozidla, s vplyvovými čiarami potrebnými pre výpočet v pozdĺžnom smere

Postup výpočtu je už uvedený čiastočne v kapitole 1. Podľa (1.4)-(1.6) je možné dostať sa až po určenie chybovej funkcie. Následne je nutné určiť koordináty vplyvovej čiary, ktoré minimalizujú funkciu E, a to sú tie, ktorých parciálne derivácie sú nulové. Pre trojnápravové vozidlo to môže byť napísané nasledovne:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial I_R} = & 2 [I_R^M - (A_1 I_R + A_2 I_{R-C_2} + A_3 I_{R-C_3})] (-A_1) \\ & + 2 [I_{R+C_2}^M - (A_1 I_{R+C_2} + A_2 I_R + A_3 I_{R-(C_3-C_2)})] (-A_2) \\ & + 2 [I_{R+C_3}^M - (A_1 I_{R+C_3} + A_2 I_{R-(C_3-C_2)} + A_3 I_R)] (-A_3) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Kde, $C_3 < R < (K - C_3)$. Po zadaní parciálnych derivácií rovných nule, dostaneme rovnicu K-C_N.

$$[A]_{K-C_N, K-C_N} * \{I\}_{K-C_N, 1} = \{\varepsilon\}_{K-C_N, 1} \quad (2.2)$$

Kde matica [A] je symetrická matica, vzťahujúca sa od hmotnosti náprav, {I} je vektor obsahujúci koordináty vplyvovej čiary a {ε} je vektor pomerných pretvorení. Hlavná diagonála matice [A] obsahuje sumu druhých mocnín všetkých náprav. Vedľajšie diagonály obsahujú tzv. „unikátne páry“. Trojnápravové vozidlo má 3 páry, konkrétne C₂-C₁, C₃-C₁, C₃-C₂, avšak C₁= 0, čiže v tom prípade máme výslednú maticu:

$$[A]_{K-C_3, K-C_3} = \begin{bmatrix} a_{i,i} & 0 & \dots & a_{i,i+(C_3-C_2)} & 0 & \dots & a_{i,i+C_2} & 0 & \dots & a_{i,i+C_3} & 0 & \dots \\ a_{i,i} & 0 & \dots & a_{i,i+(C_3-C_2)} & 0 & \dots & a_{i,i+C_2} & 0 & \dots & a_{i,i+C_3} & 0 & \dots \\ & a_{i,i} & 0 & \dots & a_{i,i+(C_3-C_2)} & 0 & \dots & a_{i,i+C_2} & 0 & \dots & a_{i,i+C_3} & 0 & \dots \\ & & a_{i,i} & 0 & \dots & a_{i,i+(C_3-C_2)} & 0 & \dots & a_{i,i+C_2} & 0 & \dots & a_{i,i+C_3} & 0 & \dots \\ & & & \ddots & & \ddots & & \ddots & & \ddots & & \ddots & & \ddots \\ & & & & & & & & & & & & & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & a_{i,i+C_3} \\ & & & & & & & & & & & & & \vdots \\ & & & & & & & & & & & & & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & \vdots \\ & & & & & & & & & & & & & a_{i,i+C_2} \\ & & & & & & & & & & & & & \vdots \\ & & & & & & & & & & & & & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & \vdots \\ & & & & & & & & & & & & & a_{i,i+(C_3-C_2)} \\ & & & & & & & & & & & & & \vdots \\ & & & & & & & & & & & & & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & \vdots \\ & & & & & & & & & & & & & a_{i,i} \\ & & & & & & & & & & & & & a_{i,i} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Symmetric

Kde

$$a_{i,i} = \sum_i^N A_i^2 = \text{prvky hlavnej diagonály}$$

$$a_{i,i+(C_3-C_2)} = A_2 A_3$$

$$a_{i,i+C_2} = A_1 A_2 \quad \text{prvky vedľajších diagonál}$$

$$a_{i,i+3} = A_1 A_3$$

Vektor pomerných pretvorení závisí od hmotností náprav a nameraných účinkoch.

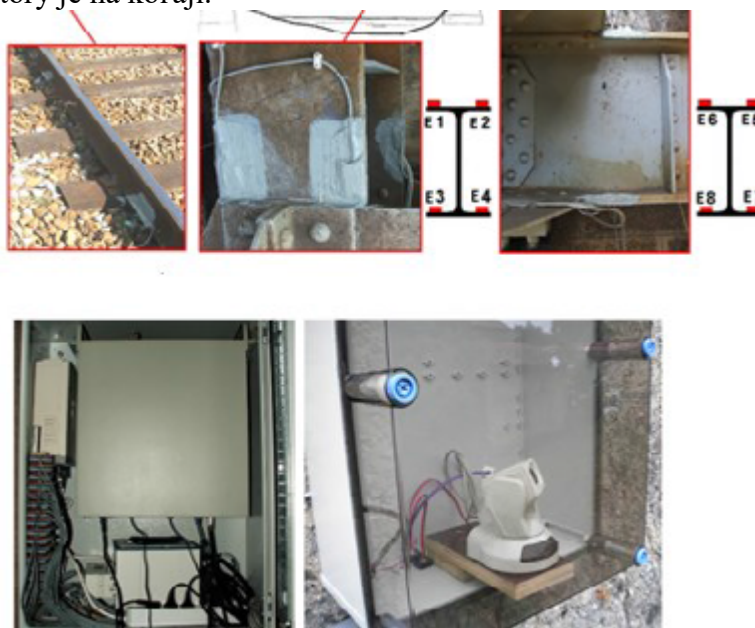
$$\{\varepsilon\}_{K-C_N, 1} = \begin{bmatrix} A_1 L_1^M + A_2 L_{1+C_2}^M + \dots + A_N L_{1+C_N}^M \\ A_1 L_2^M + A_2 L_{2+C_2}^M + \dots + A_N L_{2+C_N}^M \\ A_1 L_3^M + A_2 L_{3+C_2}^M + \dots + A_N L_{3+C_N}^M \\ \vdots \\ A_1 L_{K-C_3}^M + A_2 L_{K+C_2}^M + \dots + A_N L_K^M \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Následne za pomoci tohto postupu je možné určiť vplyvovú čiaru pomocou úpravy rovnice (2.2).

$$\{I\} = [A]^{-1} * \{\varepsilon\} \quad (2.5)$$

3. Spracovanie údajov

Spracovanie údajov bude prebiehať za pomoci tenzometrov. Sledované budú teda pomerné pretvorenia. Pre správnosť údajov bude kladený dôraz na správne zapojenie tenzometrickej sústavy do Wheatesonovho mostíka. Budú použité polovičné mostíky. Najčastejšie sa používa plne automatická stanica so zbernou stanicou, kamerovým systémom a tenzometrami. V prípade dizertačnej práce bude použitá zberná stanica od firmy National Instruments a merania budú prebiehať výhradne manuálne. Kamerový systém teda nebude potrebný. Tenzometrické snímače budú umiestnené na konštrukcii nosníkov. V rámci experimentu budú snímače uložené aj do koľajníc. Výsledky budú neskôr porovnávané a bude zisťovaný rozdiel medzi BWIM ktorý je priamo na konštrukcii a tým, ktorý je na koľaji.



Obrázok 6. Ukážka osadených tenzometrov, stanice na spracovanie údajov a kamery [4]

Ako kalibračné vozidlo bude vybraná neskôr dohodnutá lokomotíva, ktorá bude prechádzať opakovane po mostnej konštrukcii konštantnou rýchlosťou. Následným spracovaním údajov bude možné určiť vplyvovú čiaru.

Podstatnou zložkou merania je dôsledná príprava, nielen na konštrukcii, ale aj samotná príprava programu. Výsledky bude potrebné spracovať a pripraviť na merania prechodu neznámych vlakov. Problémom je vplyvová čiara. Tá bude vygenerovaná pri K počte snímok a vektor vplyvovej čiary bude mať K členov v stĺpci. Neskoršie merania ale budú mať iný počet snímok a vplyvovú čiaru bude potrebné zakaždým prispôbiť danému meraniu správnym interpolovaním.

Zatriedenie mostnej konštrukcie podľa prednormy [5] bude nevyhnutné kvôli redukovaniu dynamických účinkov na vplyv merania. Tie je potrebné minimalizovať. Snahou bude priblížiť sa triede A čo najviac, ako bude možné.

Ako je uvedené v [4], vlak má vplyv na meranie už približne 50 metrov pred príchodom na konštrukciu, a je potrebné tieto negatívne ruchy odfiltrovať. Väčšinou sú to veľmi nízke frekvencie, kde ich horná hranica je individuálna pre každý most. [4] je uvádzané, že filtráciou frekvencií pod 0,5 Hz je zabezpečené, že rušivé vplyvy okolia nebudú skresľovať výsledky. Pre konkrétny most, ktorý bude neskôr meraný môže byť hranica iná, závisí to od typu a veľkosti konštrukcie.

Tabuľka 1. Zatriedenie mostných konštrukcií do tried podľa presnosti merania [5]

| Typ merania | Veľkosť zaťaženia | Trieda presnosti | | | | | | |
|--------------------|---------------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|-----|
| | | Interval tolerancie d (%) | | | | | | |
| | | A (5) | B+ (7) | B (10) | C (15) | D+ (20) | D (25) | E |
| celková váha | celková váha >3500 kg | 5 | 7 | 10 | 15 | 20 | 25 | >25 |
| váha nápravy | hmotnosť nápravy >1000 kg | | | | | | | |
| skupina náprav | | 7 | 10 | 13 | 18 | 23 | 28 | >28 |
| samostatná náprava | | 8 | 11 | 15 | 20 | 25 | 30 | >30 |
| náprava skupiny | | 10 | 14 | 20 | 25 | 30 | 35 | >35 |

Záver

Cieľom metódy BWIM je meranie hmotností vozidiel prechádzajúcich po moste, bez výrazného zásahu do mostnej konštrukcie. Po automatizácii, je možné presne identifikovať vozidlá prechádzajúce po konštrukcii a možnosť zistiť či nie sú preťažené, aj bez toho, aby bola potrebná priama prítomnosť na moste. Okrem okamžitého zistenia hmotností vozidiel je veľmi vhodnou metódou meraní aj z dlhodobého hľadiska. Pri opakovanom prechode kalibračného vozidla v rámci dlhšieho časového úseku je možné zistiť odchýlky v odozve mosta a tak včas zistiť poruchy, ktoré sa môžu vyskytnúť na konštrukcii.

Literatúra

1. Článok v časopise

Moses, F., "Weigh-in-Motion System using Instrumented Bridges", Transportation Engineering Journal ASCE, 105, TE3, 233-249, 1979

2. Záverečná práca

Quilligan M., Bridge Weigh-in-Motion Development of a 2-D Multi-Vehicle Algorithm, Licentiate Thesis, 2003

3. Článok v časopise

Žnidarič A., Kalin J., Kreslin M., Favai P., Kolakowski P., Railway bridge Weigh-in-Motion system, 2016

4. Článok v časopise

Marques F., Moutinho C., Wei Hua Hu, Cunha Á., Caetano E., Weigh-in-motion implementation in an old metallic railway bridge, Jún 2016

5. Pred-norma

prEN XXX:2013, Weight-in-Motion of Road Vehicles, Január 2013

Aleksandar Vidaković¹

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: 3. ročník

TEORETICKÁ ANALÝZA DISTRIBÚCIE PRIEČNEHO ZAŤAŽENIA A SPOLUPÔSOBIACA ŠÍRKA V KONZOLOVÝCH DOSKÁCH

THEORETICAL ANALYSIS OF TRANSVERSE LOAD DISTRIBUTION AND EFFECTIVE SHEAR WIDTH IN CANTILEVER SLABS

Cantilever slabs under concentrated load have an ability to distribute the load in transverse direction. The shear capacity calculated by keeping with the current codes of practice is presented and compared to the obtained failure loads from the available experiments. A large scatter is obtained between the presented models and this proves the difficulty in regarding the internal force distribution as well as the shear carrying width. Recommendations based on the Eurocode provisions are presented for effective shear width. Finally, the prepared experimental program of cantilever slab specimens representing the deck slabs of bridges is presented.

1. Úvod

Najväčší počet mostov na území Slovenska bolo postavených medzi rokmi 1961 a 1971 [1]. Tieto mosty ešte stále slúžia cestnej doprave a boli navrhnuté podľa starších noriem, podľa ktorých v mnohých prípadoch nebolo potrebné navrhovať šmykovú výstuž v mostovkových doskách. Po zavedení Eurokódov [2] sa situácia zmenila a je častokrát potrebné navrhovať aj šmykovú výstuž, čo vedie k zvýšeným nákladom a prácnosti pri navrhovaní a realizácii mostných konštrukcií.

Normové predpisy, na základe ktorých sa posudzuje šmyková odolnosť mostovkových dosiek namáhaných koncentrovaným zaťažením, boli odvodené z databázy, ktorá obsahuje dáta z experimentov zrealizovaných na proste podopretých nosníkoch, prípadne doskových pásoch (kde pomer šírky k účinnej výške prierezu je menší ako 4) zaťažených po celej šírke prierezu. Navyše, použiteľnosť týchto modelov pre mostovkové dosky je otázna aj z dôvodu, že veľké množstvo týchto experimentov bolo zrealizovaných na vzorkách s vysokým stupňom vystuženia, čo nie je skutočným príkladom reprezentujúcim mostovkové dosky [3].

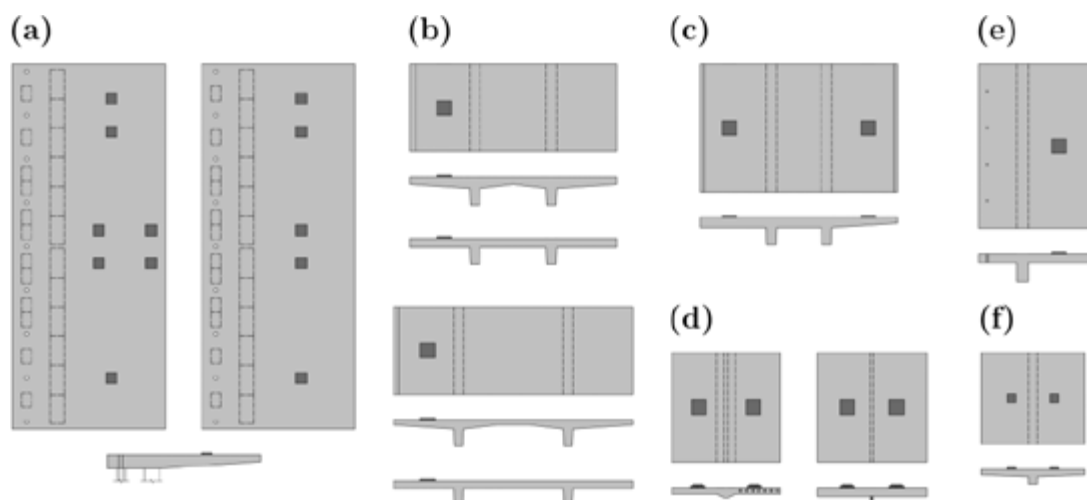
2. Databáza experimentov

Aj napriek mnohým experimentálnym výskumom zrealizovaným v poslednom desaťročí, model popisujúci šmykovú odolnosť mostovkových dosiek namáhaných koncentrovaným zaťažením stále nie je k dispozícii.

Pre vyhodnotenie bezpečnosti súčasných modelov na stanovenie šmykovej odolnosti mostovkových dosiek bola vytvorená databáza zo všetkých v literatúre dostupných experimentálnych testov ktoré boli vykonané na konzolových doskách s koncentrovaným zaťažením. Databázu tvorí spolu 43 experimentov, z čoho päť experimentálnych programov bolo zrealizovaných v zahraničí [3-7] (Obr. 1(a-e)) a jeden nedávno v Bratislave [8] (Obr. 1(f)). Všetky dosky sú bez šmykovej výstuže a boli porušené prekročením šmykovej odolnosti od koncentrovaného zaťaženia.

Podrobnejšie informácie o geometrii, materiálových vlastnostiach a experimentálnych výsledkov prezentovanej databázy je možné nájsť v publikáciách [3-9].

¹ Aleksandar Vidaković, Ing., Katedra betónových konštrukcií a mostov, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava



Obr. 1: Experimentálny program: (a) Vaz Rodrigues et al. [4]; (b) Rombach a Latte [3]; (c) Reissen a Hegger [5]; (d) Natário et al. [6]; (e) Rombach a Henze [7]; a (f) Vida a Halvonik [8].

3. Modely pre výpočet šmykovej odolnosti

Šmyková odolnosť mostovkových dosiek je jedným z hlavných parametrov, ktoré je potrebné overiť pri návrhu novej ako aj pri posudzovaní spoľahlivosti existujúcej konštrukcie. Na rozdiel od ohybového porušenia ktoré signalizuje nadmerné priehyby konštrukcie, šmykové porušenie má krehký charakter, t.j. zlyhanie konštrukcie je neočakávané a preto je potrebné tejto oblasti venovať zvýšenú pozornosť.

Pre všetky výpočty boli použité skutočné namerané hodnoty materiálových vlastností, bez uváženia parciálnych faktorov zaťaženia a materiálových neistôt (γ_F a $\gamma_M = 1,0$).

3.1 Eurokód 2

Šmyková odolnosť podľa súčasne platného Eurokódu STN EN 1992-1-1 [2] (EC2), pre prvky bez šmykovej výstuže využíva empirický prístup, v ktorom bol na základe dostupnej databázy výsledkov z nosníkov odvodený nasledovný vzťah:

$$V_{R,c} = \left[C_{R,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_c)^{\frac{1}{3}} \right] \cdot b_{eff} \cdot d \geq 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_{eff} \cdot d \quad (1)$$

kde $C_{R,c}$ je empirický faktor (uvažuje sa 0,18 MPa), f_c je pevnosť betónu v tlaku (v MPa), d je účinná výška prierezu (v mm), ρ_l je pozdĺžny stupeň vystuženia a b_{eff} je účinná šírka prierezu (v mm). Súčiniteľ k zohľadňujúci tzv. “size-effect” je stanovený podľa:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad d \text{ v mm} \quad (2)$$

3.2 Model Code 2010

fib Model Code 2010 (MC2010) [10] ponúka tri možnosti výpočtu šmykovej odolnosti podľa metódy úrovni priblíženia: dve analytické metódy Level I, Level II a jednu numerickú metódu Level IV ktorá sa počíta pomocou nelineárnej analýzy. Šmyková odolnosť sa vypočíta podľa vzorca:

$$V_{R,c} = k_v \cdot \sqrt{f_c} \cdot z \cdot b_{eff} \quad (3)$$

kde účinná šmyková výška z (v mm) môže byť uvažovaná ako $0,9d$. Podľa metódy úrovni priblíženia Level II, k_v sa vypočíta podľa vzorca:

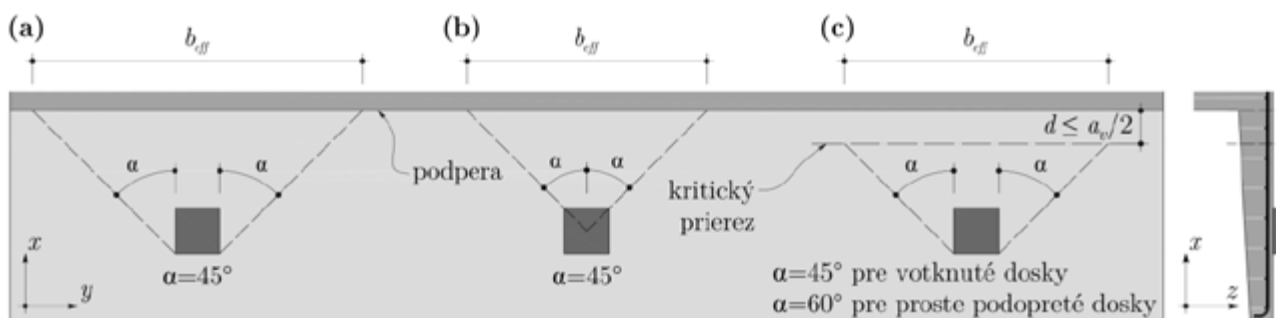
$$k_v = \frac{0,4}{1+1500 \cdot \varepsilon_x} \frac{1300}{1000+k_{dg} \cdot z} \quad (4)$$

kde ε_x je pomerné pretvorenie prvku v strede účinnej výšky a k_{dg} je parameter zohľadňujúci typ kameniva, ak je maximálne zrno kameniva 16 mm, potom $k_{dg} = 1,0$.

4. Spolupôsobiacia šírka dosky

Všeobecne je známe, že dosky namáhané koncentrovaným zaťažením majú väčšiu šmykovú odolnosť ako nosníky alebo dosky ktoré sú namáhané plošným zaťažením, vďaka ich šírke prierezu, ktorá umožňuje redistribúciu vnútorných síl v priečnom smere do podpery.

Na rozdiel od nosníkov, šmyková odolnosť dosiek namáhaných koncentrovaným zaťažením by preto nemala byť počítaná na celej šírke prierezu b , ale iba na tzv. spolupôsobiacej (účinnej alebo efektívnej) šírky prierezu b_{eff} . Problém sa javí v tom, že Eurokód 2 neponúka model na uváženie priečného roznosu pre šmykové posúdenie dosiek pri pôsobení koncentrovaného zaťaženia. V praxi sa na určenie účinnej šírky prierezu b_{eff} používajú iba zjednodušené inžinierske metódy. Tie však nie sú normovo predpísané a môžu byť definované iba v národných prílohách. Príkladom na Obr. 2(a) je zobrazený model priečného roznosu definovaný podľa francúzskej národnej prílohy a na Obr. 2(b) model používaný v Holandsku [11]. Obe metódy sú založené na roznose pod uhlom 45° . V prípade francúzskeho postupu sa roznos meria od vzdialenejšieho okraja zaťažovanej plochy a v prípade holandského postupu od stredu zaťažovanej plochy. Ďalším modelom je model na Obr. 2(c) uvedený v Model Code 2010 [10]. Tento model navyše berie do úvahy aj typ podpery. Vzdialenosť prierezu, v ktorom sa má šmyková odolnosť posúdiť je rovná menšej z hodnôt d a $a_v/2$ od líca podpery.

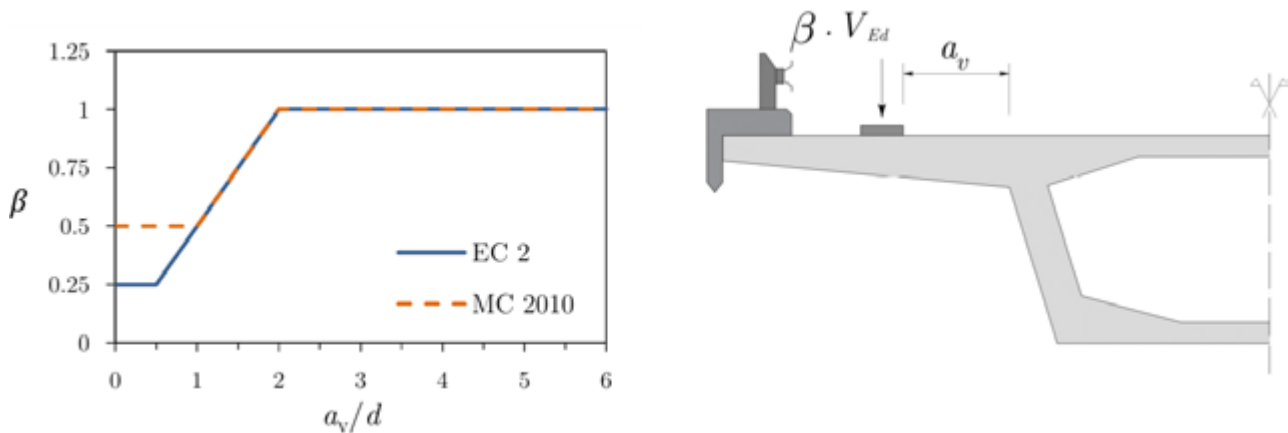


Obr. 2: Model priečného roznosu podľa: (a) francúzskeho; (b) holandského [11]; a (c) Model Code 2010 [10] postupu.

5. Priamy prenos zaťaženia do podpery

V prípade prvkov, na ktorých zaťaženie pôsobí v blízkosti podpery sa zvyšuje šmyková únosnosť, čo je spôsobené priamym prenosom zaťaženia do podpery. Odsek 6.2.2 (6) podľa Eurokódu STN EN 1992-1-1 [2], definuje príspevok priameho prenosu zaťaženia do podpery nasledovne; “U prvkov so zaťažieniami pôsobiacimi na hornom povrchu vo vzdialenosti $0,5d \leq a_v \leq 2d$ od okraja podpery (alebo od stredu ložiska, kde sú použité elastomerné ložiská), dovoľuje sa príspevok zaťaženia k šmykovej sile V_{Ed} prenásobiť $\beta = a_v/2d$. Táto redukcia sa dovoľuje použiť pri posúdení $V_{Rd,c}$ zo vzťahu (6.2.a) [vzťah (1) podľa tohto príspevku]. To platí len za predpokladu, že pozdĺžna výstuž je plne zakotvená v podpere. Pre $a_v \leq 0,5d$ sa má použiť hodnota $a_v = 0,5d$.”

Na Obr. 3 je názorne podľa grafu zobrazený lineárny priebeh tohto redukčného faktora β podľa Eurokódu 2 [2] a Model Code 2010 [10] v závislosti od polohy zaťaženia a_v/d , kde a_v je šmykové rozpätie, t.j. svetlá vzdialenosť medzi zaťažením a podperou, a d je účinná výška prierezu.

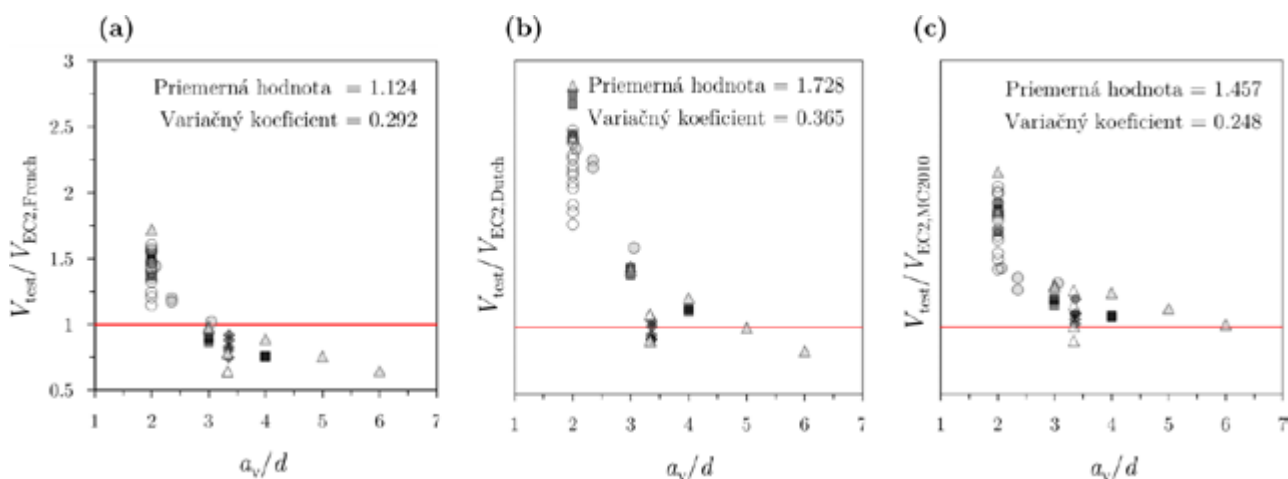


Obr. 3: Vplyv redukčného faktora β podľa Eurokódu 2 [2] a Model Code 2010 [10].

6. Analýza šmykovej odolnosti

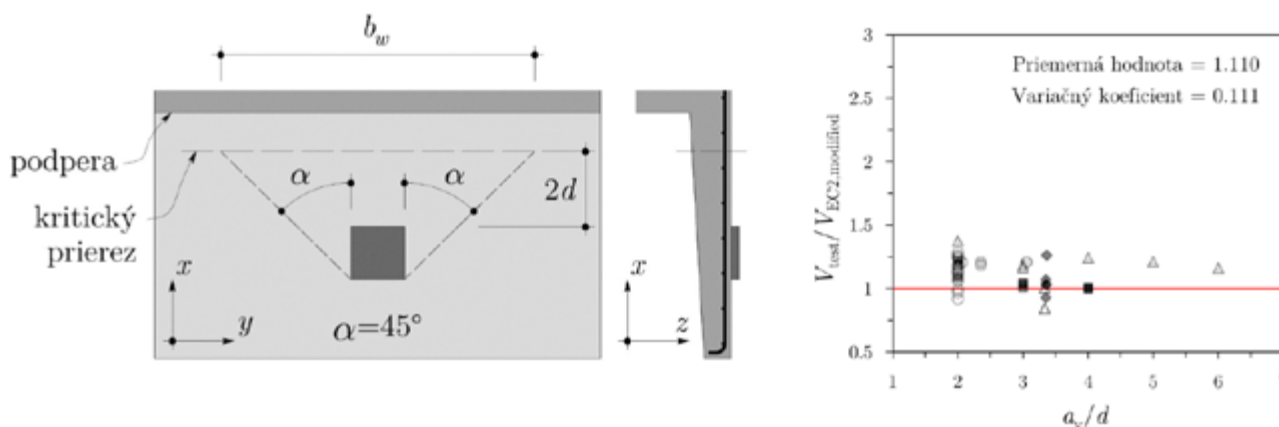
Porovnania výsledkov z databázy experimentov V_{test} s vypočítanými hodnotami podľa francúzskeho a holandského postupu podľa súčasného Eurokódu V_{EC2} a podľa Model Code 2010 V_{MC2010} sú zobrazené na Obr. 4(a-c).

Z daného obrázka môžeme vidieť, že sú výsledky podľa francúzskeho postupu mierne konzervatívne pre prípad zaťaženia v blízkosti podpory $a_v/d \leq 2d$, kým výsledky získané podľa holandského postupu a Model Code 2010 sú až veľmi konzervatívne. Nakoľko žiaden experiment z databázy nebol skúšaný so šmykovým rozpätím $a_v < 2d$, príspevok redukčného faktora β nebol zohľadnený. Postupným vzdďalovaním polohy zaťaženia a_v/d bezpečnosť modelov začala výrazne klesať, čo spôsobilo postupné zväčšovanie účinnej šírky prierezu b_{eff} . Variačný koeficient dosiahol hodnotu 0,292 pre francúzsky, 0,365 pre holandský postup a 0,248 pre Model Code 2010.



Obr. 4: Porovnanie medzi experimentálnymi hodnotami šmykovej sily V_{test} a vypočítanými hodnotami podľa: (a) francúzskeho ($V_{EC2, French}$); (b) holandského ($V_{EC2, Dutch}$); a (c) Model Code 2010 (V_{MC2010}) postupu.

Na základe týchto výsledkov bolo nutné navrhnuť obmedzenie maximálnej účinnej šírky prierezu b_{eff} na vzdialenosť $2d$ od líca zaťažovanej plochy, podľa Obr. 5. Taktiež bola navrhnutá aj úprava redukčného faktora na $\beta = a_v/2,5d$ pre $a_v \leq 2,5d$ [9].



Obr. 5: Výsledky analýzy podľa zobrazenej úpravy modelu pričného roznosu pre stanovenie účinnej šírky dosky b_{eff} a so zohľadnením úpravy redukčného faktora $\beta = a_v/2,5d$ pre $a_v \leq 2,5d$ [9].

Výsledky analýzy podľa modifikovaného francúzskeho postupu podľa Eurokódu $V_{EC2,modified}$ sú zobrazené na Obr. 5. Vysoká kvalita modelu je definovaná priemernou hodnotou medzi šmykovou silou získanou experimentálnymi testami a výpočtovým modelom $V_{test}/V_{EC2,modified} = 1,110$ a malou hodnotou variačného koeficienta 0,111, čím sa výrazne zvýšila bezpečnosť návrhového modelu na predikciu šmykovej odolnosti.

7. Záver

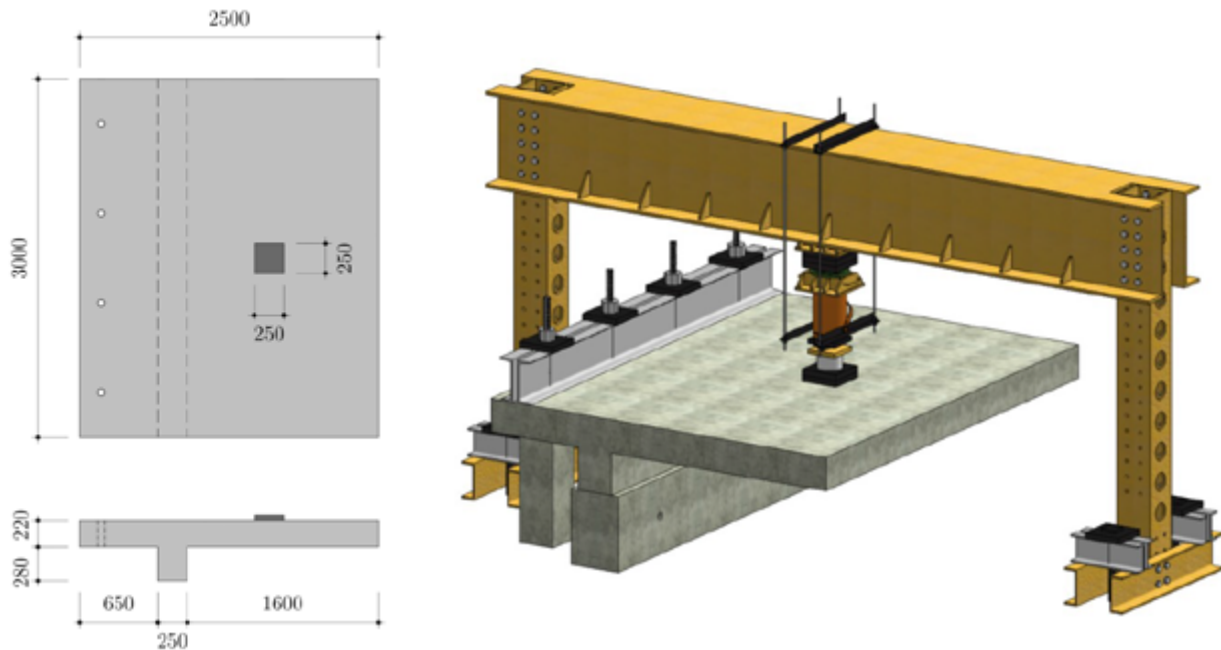
Z výsledkov analýzy je možné skonštatovať nasledovné závery:

- bezpečnosť súčasných postupov podľa Eurokódu, ktoré sú zamerané na výpočet účinnej šírky dosky s redistribúciou šmykových síl pod uhlom 45° sú výrazne ovplyvnené polohou zaťaženia a_v/d . So zvyšujúcim sa pomerom a_v/d bezpečnosť modelov klesá;
- holandský postup sa javí ako nespoľahlivý a veľmi konzervatívny $V_{test}/V_{EC2,Dutch} = 1,728$ s variačným koeficientom až 0,365;
- model podľa Model Code 2010 [10] sa javí ako konzervatívny pre polohu zaťaženia v blízkosti podpory a pre zvyšujúce sa a_v/d bezpečnosť modelu náhle klesá;
- preto bola podľa výsledkov analýzy navrhnutá jednoduchá úprava francúzskeho postupu so zavedením maximálnej vzdialenosti polohy kritického prierezu $2d$ od vnútorného líca zaťažovanej plochy a modifikovaný bol redukčný faktor $\beta = a_v/2,5d$ pre $a_v \leq 2,5d$. Touto úpravou sa dosiahla oveľa väčšia bezpečnosť návrhového modelu na predikciu šmykovej odolnosti mostovkových dosiek.

Takýto jednoduchý analytický model je možné používať pri návrhu nových ako aj pri posudzovaní spoľahlivosti existujúcich mostovkových dosiek.

V súčasnosti v Bratislave prebieha experimentálny výskum ďalších konzolových dosiek namáhaných koncentrovaným zaťažením, kde sa bude sledovať vplyv tlačenej výstuže a polohy zaťaženia na šmykovú odolnosť s cieľom potvrdiť správnosť navrhnutého modelu.

Geometria prichystaných vzoriek a axonometria navrhutej experimentálnej zostavy sú zobrazené na Obr. 6. Koncentrované zaťaženie bude vnášané cez oceľové platne 250 mm x 250 mm. Toto bude zabezpečené pomocou hydraulického lisu, ktorý bude uložený na tuhý oceľový rám zakotvený do pevnej podlahy laboratória. Pasívna časť konzoly bude votknutá pomocou štyroch predpínacích tyčí. Oceľový rám je postavený tak, aby umožnil voľné posúvanie hydraulického lisu, t.j. aby sa dali skúmať rôzne polohy zaťaženia $a_v/d = 2, 3, 4$ a 5.



Obr. 6: Geometria a navrhnutá zaťažovacia zostava experimentálnych vzoriek.

PodĎakovanie

Tento príspevok vznikol vďaka finančnej podpore Agentúry na podporu, výskum a vývoj na základe zmluvy č. APVV-17-0204 a za finančnej podpory Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva a vedy SR. Registračné číslo projektu je VEGA 1/0254/19.

Literatúra

- [1] PAULÍK, P.: Mosty na území Slovenska. *JAGA GROUP*, Bratislava, 2012, 258 s.
- [2] STN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhovanie betónových konštrukcií – Časť 1-1: *Všeobecné pravidlá a pravidlá pre pozemné stavby*, Slovensko, 2006.
- [3] ROMBACH, G.; LATTE, S.: Shear resistance of bridge decks without shear reinforcement. *Proceedings of the International FIB Symposium*, 2008.
- [4] VAZ RODRIGUES, R. et al.: Shear strength of R/C bridge cantilever slabs. *Engineering Structures*, 2008.
- [5] REISSEN, K.; HEGGER, J.: Experimental investigations on the effective width for shear. *Proceedings of the 8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS*, Foz do Iguaçu, Brazil, 2016.
- [6] NATÁRIO, F. et al.: Shear strength of RC slabs under concentrated loads near clamped linear supports. *Engineering Structures* 76: 10-23. 2014.
- [7] ROMBACH, G.; HENZE, L.: Shear capacity of concrete slabs under concentrated loads close to support. *Proceedings of the 2017 PhD Symposium*, Maastricht, 2017
- [8] VIDA, R. et al.: Experimentálne overenie priečného roznosu koncentrovaného zaťaženia pre šmyk. *24. Betonárske dny 2017*, Litomyšl, Česko, 2017.
- [9] VIDAKOVIĆ, A.; HALVONIK, J.: Shear resistance of clamped deck slabs assessed using design equations and FEM analysis. *13th International Conference, Modern Building Materials, Structures and Techniques*. Vilnius, Lithuania, 2019.
- [10] *FIB Model Code for Concrete Structures 2010*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), 2013.
- [11] LANTSOUGHT, E. O. L. et al.: Shear in one-way slabs under concentrated load close to support. *ACI Structural Journal*, 2013.

WATER RESOURCES ENGINEERING

Adam Brziak¹

Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, 2. ročník

ANALÝZA VÝSKYTU A TRVANIA SNEHOVEJ POKRÝVKY NA VYBRANÝCH RAKÚSKYCH POVODIACH

ANALYSIS OF OCCURRENCE AND DURATION OF SNOW COVER IN SELECTED AUSTRIAN CATCHMENTS

Snow is included to vertical precipitation, it is a specific form of solid state of water. It is formed by transformation of water vapour or by freezing of rain drops in atmosphere. Snow precipitation fundamentally affect water balance, it belongs to important elements in hydrological cycle. Snow cover is significant as water supply mainly in mountain regions. Snow cover can negatively influence on people in the form of avalanches in winter season and may case floods in spring season when snow is melting. Basic snow cover characteristics are bulk density of snow, snow water equivalent and height of snow cover. This paper is focused on comparison of snow cover occurrence simulated in a conceptual, semi-distributed, rainfall-runoff model TUV, with measured values in Austrian river basins. The simulated snow water equivalent and observed snow height of snow cover in two austrian river basins are compared.

Klíčové slová: TUV model, snehová pokrývka, vodná hodnota snehu

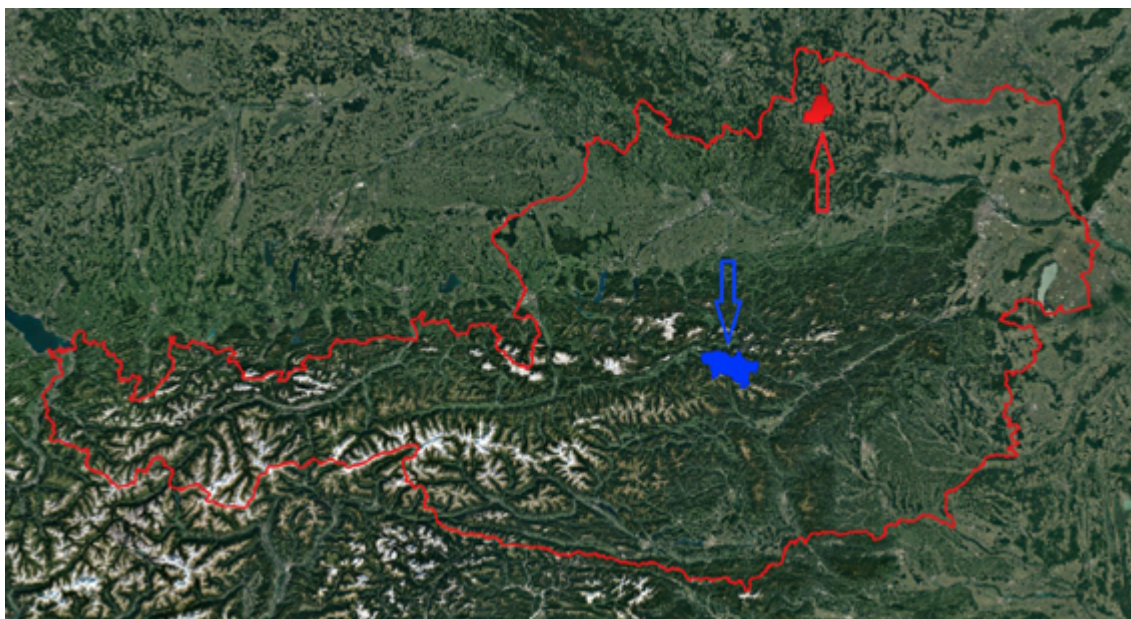
1. Úvod

V posledných desaťročiach sa zaznamenáva všeobecný úbytok snehovej pokrývky. Vzrast priemernej teploty vzduchu v horských regiónoch zodpovedá posunu snežnej čiary asi o 150 m vyššie [1]. Sneh patrí medzi dôležité zložky v hydrologickom cykle, je významný ako zásoba vody a to najmä v horských povodiach. Zásadne ovplyvňuje vodnú bilanciú a odtok z povodia, preto je zároveň aj významnou zložkou v zrážkovo-odtokovom modeli TUV.

Snehová pokrývka je v našich zemepisných šírkach špecifická svojou sezónnosťou [2]. Preto sa v práci zameriame na porovnanie výskytu snehovej pokrývky sledovanej dennými meraniami výšky snehu a vodnou hodnotou snehu simulovanou koncepčným semi-distribuovaným modelom TUV.

Pre porovnanie boli vybrané dva povodia lokalizované v Rakúsku. Jedno nížinné povodie rieky Thaya s rozlohou 175,5 km² s vodomernou stanicou lokalizovanou v Schwarzenau a jedno horské povodie rieky Paltenbach s rozlohou 368,7 km² a vodomernou stanicou v Selzthal (Obr. 1).

¹ Adam Brziak, Ing., Radlinského 11. 810 05 Bratislava



Obr. 1: Zaujmové povodia, modrá farba horské povodie, červená farba nížinné povodie

Pozorovanie zimných období a sledovanie výskytu snehovej pokrývky na simulovaných a meraných dátach nám dáva prehľad o tom, či model správne vyhodnocuje výskyt snehovej pokrývky a či je správne nakalibrovaný. Správne vyhodnotenie snehovej zložky modelu má významný vplyv na konečnú modelovanú hodnotu odtoku.

2. Zrážkovo odtokový model TUW

Zrážkovo-odtokové modely sú často aplikované pri riešení rôznych vodohospodárskych úloh (predpovedanie priebehu povodní, vplyv zmeny klímy, simulovanie extrémnych prietokov, atď.) [3]. V simulovanom období sa však môžeme stretnúť s klimatickými podmienkami odlišnými od kalibračných. Viacero autorov preto upozorňuje, že použitie týchto modelov v rozdielnych klimatických podmienkach vedie k neistotám, ktoré ovplyvnia kvalitu výstupov [4,5,6,7,8]. TUW model vychádza z HBV modelu, pričom pozostáva s troch submodelov, snehového, pôdneho a z odtokového submodelu [9].

Model bol kalibrovaný pre 213 rakúskych povodí, pre obdobie 2007-2014. Parametre modelu boli optimalizované pomocou lineárnej kombinácie kritérií Nash-Sutcliffovho koeficientu (NSE), logaritmickeho Nash-Sutcliffovho koeficientu (logNSE) a evolučného algoritmu.

Po kalibrácii modelu boli namodelované vodné hodnoty snehu pre všetkých 213 povodí pre obdobie rokov 1976 – 2010. Pre prácu boli vybrané dve povodia, jedno nížinné a jedno horské povodie. Výsledky kalibrácie môžeme vidieť v Tab. Č. 1.

| ID | Plocha [km ²] | Stanica | Povodie | Typ povodia | NSE | logNSE |
|--------|---------------------------|-------------|------------|-------------|------|--------|
| 208611 | 175,5 | Schwarzenau | Thaya | Nížinné | 0,7 | 0,53 |
| 210815 | 368,7 | Selzthal | Paltenbach | Horské | 0,76 | 0,74 |

Tab. Č. 1: Výsledky koeficientov NSE a logNSE

3. Porovnanie výskytu snehovej pokrývky

Vodná hodnota snehu bola modelovaná semi-distribúvaným modelom TUW, čo znamená, že povodia boli rozdelené do výškových zón a model simuloval vodnú hodnotu snehu v každej výškovvej zóne zvlášť. Rakúsko má 19 výškových zón, pričom prvá výšková zóna zahŕňa výšky od 0 do 200 m.n.m, nasledujúca zóna zahŕňa výšky od 200 do 400 m.n.m atď.

Nížinné povodie rieky Thaya obsahuje len dve výškové zóny a to 400-600 m.n.m a 600-800 m.n.m. Na obr. č.1 je vidieť priebeh meranej výšky snehu ktorá predstavuje priemernú hodnotu výšky snehu v jednej výškovvej zóne a simulovanej vodnej hodnoty snehu v rokoch 2005-2010, pričom graf ukazuje zimné obdobia s nameranou trvalou snehovou pokrývkou, ktorá má priebeh trvania podobný so simulovanou vodnou hodnotou snehu.



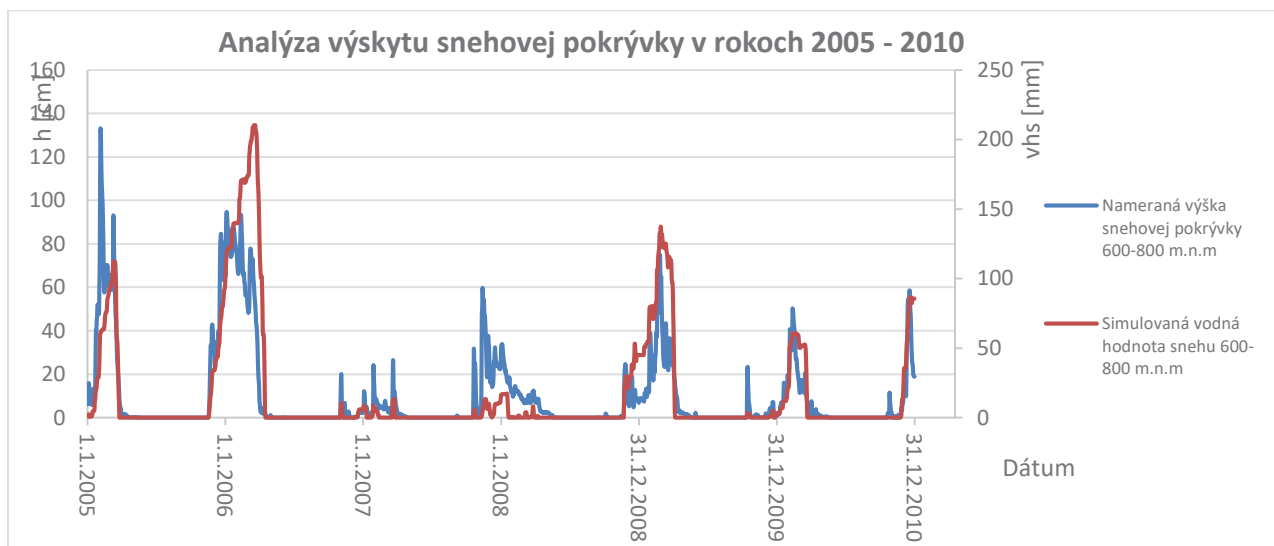
Obr. č.1: Porovnanie simulovanej vodnej hodnoty snehu a nameranej výšky snehovej pokrývky

Na obr. č.2 je znázornené vybrané zimné obdobie v rozmedzí 1.11.2007-31.5.2008, kde sú zobrazené priebehy simulovaného a nameraného výskytu snehovej pokrývky v 2 výškových pásmach. Pre obidve pásma vidíme spoločný nárast simulovanej vodnej hodnoty a meranej výšky snehu, a taktiež spoločný pokles. Táto analýza nám potvrdzuje, že model správne vyhodnocuje výskyt snehovej pokrývky v zimnom období.



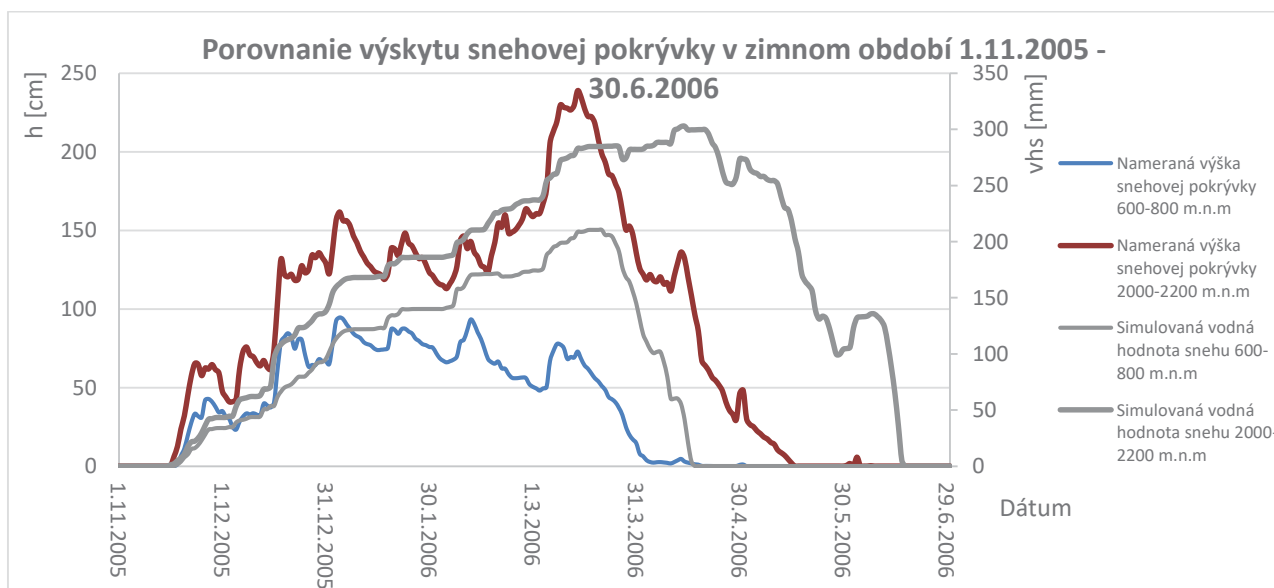
Obr. č.2: Porovnanie simulovanej vodnej hodnoty snehu a nameranej výšky snehovej pokrývky v zimnom období 1.11.2007 – 31.5.2008

Horské povodie rieky Paltenbach obsahuje 8 výškových zón, pričom najnižšia výšková zóna je 600-800 m.n.m a najvyššia 2000-2200 m.n.m. Pre väčší prehľad priebehu simulovanej vodnej hodnoty a meranej výšky snehu je na obr. č.3 zobrazený priebeh výskytu snehovej pokrývky v rokoch 2005-2010 v najnižšej výškovej zóne 600-800 m.n.m., kde je vidieť všetky zimné obdobia v tomto rozsahu rokov.



Obr. č.3: Porovnanie simulovanej vodnej hodnoty snehu a nameranej výšky snehovej pokrývky

Na obr. č.4 je znázornené vybrané zimné obdobie v rozmedzí 1.11.2005-31.6.2006, kde sú zobrazené priebehy výskytu simulovaného a nameraného výskytu snehovej pokrývky. Vidíme spoločný nárast simulovanej vodnej hodnoty aj meranej výšky snehu a taktiež spoločný úbytok. Táto analýza nám potvrdzuje že model správne vyhodnocuje začiatok výskytu snehovej pokrývky v zimnom období a slabšie koniec výskytu v najvyššom výškovom pásme.



Obr. č.4: Porovnanie simulovanej vodnej hodnoty snehu a nameranej výšky snehovej pokrývky v zimnom období 1.11.2005 – 30.6.2006

Pre porovnanie bola znázornená najnižšia výšková zóna 600-800 m.n.m a najvyššia výšková zóna 2000-2200 m.n.m.

4. Záver

Cieľom príspevku bolo zistiť, či zrážkovo-odtokový model TUW po kalibrácii správne vyhodnocuje výskyt snehovej pokrývky. Bolo sledované obdobie v rozsahu rokov 2005-2010 z dôvodu, že v tomto časovom období sa nám prekrývali simulované dáta s meranými údajmi z Rakúskej databázy. V grafických výsledkoch môžeme vidieť, že model s dobrou presnosťou simuluje výskyt snehovej pokrývky ako zložky zrážkovo-odtokového modelu, čo má veľký vplyv na výsledné hodnoty simulovaného odtoku, keďže sneh hlavne v horských povodiach je významným zdrojom vody pre odtok.

Referencie

[1] HAEBERLI W., BENISTON M (1998): Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio* 27: 258-265.

[2] VOJTEK M., FAŠKO P., ŠŤASTNÝ P. (2003): Dynamika snehovej pokrývky v stredných a vysokých horských polohách Slovenska, International Bioclimatological Workshop

[3] SLEZIAK, Patrik, et al.(2018): Závislosť kvality simulácie odtoku pomocou zrážkovo-odtokového modelu od rozdielnosti hydroklimatických podmienok kalibračného a validačného obdobia. *Acta Hydrologica Slovaca*, 2017, 18.1: 23-30.

[4] OUDIN, L., PERRIN, Ch., MATHEVET, T., ANDRÉASSIAN, V., MICHEL, C. (2006): Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency at the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, 320, 62 – 83, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.016>.

[5] VAZE, J., POST, D.A., CHIEW, F.H.S., PERRAUD, J.M., VINEY, N.R., TENG, J. (2010): Climate nonstationarity – Validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climatic changes studies. *J. Hydrol.*, 394 (3-4),447 – 457, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.09.018.

[6] MERZ, R., PARAJKA, J., BLÖSCHL, G. (2011): Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses, *Water Resour. Res.*, 47, W02531, doi: 10.1029/2010WR009505.

[7] CORON, L., ANDRÉASSIAN, V., PERRIN, C., LERAT, J., VAZE, J., BOURQUI, M., HENDRICKX, F. (2012): Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments, *Water Resour. Res.*, 48, W05552, doi:10.1029/2011WR011721.

[8] SAFT, M., PEEL, M.C., WEWTERN, A.V., PERRAUD, J.M., ZHANG, L. (2016): Bias in streamflow projections due to climate induced shifts in catchment response. *Geophys. Res. Lett.*, 43, 1574 – 1581, doi:10.1002/2015GL067326.

[9] CEOLA S. et al. (2015): Virtual laboratories: new opportunities for collaborative water science, *Supplement of Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2101–2117, doi:10.5194/hess-19-2101-2015-supplement

Daniel Buček¹

Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, ročník: 3.

POSÚDENIE MORFOLOGICKEJ STABILITY REVITALIZÁCIE MEANDRUJÚCEHO TOKU

MORPHODYNAMIC STABILITY ASSESSMENT OF RIVER RESTORATION IN MEANDERING RIVER SYSTEM

Abstract

Main objective of this paper is an assessment of morphodynamic stability of various river restoration approaches. Each approach is numerically modeled in 2 dimensions using the R2DM model. Morphodynamic simulation represents approximately one year of morphodynamic development. Results for scenario with partially opened meander indicate aggradation at inlet of meander and moderate decrease in flow rate. Scenario with fully opened meander shows aggradation at the inlet and massive decrease in flow rate. Full diversion scenario results in formation of natural river landforms (point bars, cut banks, pools, riffles).

Kľúčové slová

Revitalizácia; riečna morfológia; numerické modelovanie

1. Úvod

Subjektom skúmania je posúdenie morfolologickej stability troch revitalizačných prístupov pôvodne odrezaného a zaneseného meandra na rieke Morava. Vplyv korytotvorného prietoku na 3 navrhované spôsoby revitalizácie je posudzovaný pomocou hydrodynamického modelu s pohyblivým dnom, R2DM. V technickej dokumentácii Generálneho projektu úpravy toku (1935) je riešený meander vedený pod označením Meander DVII. Leží v chránenej oblasti, Ramsarskej lokality Niva Moravy a Dyje na riečnom kilometri 19. [1]. Sprietočnenie v rámci revitalizačného projektu *Biodiversity Program - Global Environment Facility* (GEF) bolo zabezpečené otvorením vtokovej časti meandru na 1/5 pôvodnej šírky. Vo výtokovej časti bol vyhlbený úzky kanál. Po prepojení meandra s hlavným tokom sa dostavil pozitívny efekt. Dynamika prúdenia sa zvýšila, čo pozitívne vplývalo na flóru aj faunu. Priaznivý účinok však trval približne jeden rok. V dôsledku nízkej rýchlosti prúdenia sa začal meander zanášať. Predovšetkým povodeň v roku 1997 priniesla veľmi veľké množstvo sedimentov. Za obdobie 1999 - 2004 sa vtok do meandru DVII natoľko zanesol, že sa takmer úplne uzavrel. Ďalší významný prísun sedimentov priniesla povodeň v roku 2006. Počas 10 rokov od revitalizácie sa do meandra dostalo zhruba 78 000 ton sedimentov [1][2].

V súčasnosti dochádza k interakcii vôd iba pri stredne vysokých prietokoch, ktoré prinášajú ďalší sediment. Pri nízkych prietokoch sa meander vyprázdňuje a dochádza k úhynu rýb. Z dlhodobého pozorovania morfologických zmien vyplýva, že spôsob revitalizácie meandru bol nesprávny [1].

Pre efektívnu revitalizáciu meandra by bolo vhodné vypracovať detailnú analýzu hydromorfologických pomerov a prognózu možného vývoja po implementácii revitalizačných opatrení. Z hydromorfologického hľadiska je zaujímavý vtok do meandra, ktorý má podľa dostupných štúdií kľúčový vplyv na sedimentačný a prietokový režim v meandri [1][3]. Oblasť vtoku

¹ Daniel, Buček, Ing. Stavebná fakulta STU v Bratislave Radlinského 11, 810 05 Bratislava

je predmetom modelovania prostredníctvom hydrodynamického modelu s pohyblivým dnom na troch názorných variantných riešeniach sprietočnenia.

2. Riešené varianty revitalizácie

1.1. Variant 1 – minimalistické sprietočnenie

Za súčasných podmienok dochádza k sprietočneniu meandra pri veľkých a stredne veľkých prietokoch. Variant 1 predstavuje pomerne nízko rozpočtové riešenie pre zvýšenie prúdenia vody v meandri a jeho sprietočnenie aj pri priemerných prietokoch. Riešenie by malo prispieť k zlepšeniu ekologických pomerov v meandri. Úprava spočíva v rozšírení a prehĺbení pôvodného napojenia meandru na hlavný tok. Uvažovaná geometria vtokového aj výtokového kanála má lichobežníkový profil so sklonom brehov 1:2 s jednotnou kótou dna 139,5 m n. m. a šírkou dna 20 m.

1.2. Variant 2 - sprietočnenie na plnú šírku meandra

Variant 2 zabezpečuje sprietočnenie meandra pripojením na plnú pôvodnú šírku. Uvažovaná geometria koryta má lichobežníkový profil so sklonom brehov 1:3. Kóta dna je 138.0 m n. m. a šírka dna je 60 m. Variant 2 vyžaduje vyčistenie nánosov v meandri a upravenie koryta na pôvodné parametre pred generálnej úpravy toku Moravy [1]. Objem materiálu potrebného na odstránenie sa rovná rozdielu výšky terénu aktuálneho stavu meandra a výšky terénu upraveného pre variant 2. Výsledná hodnota je zhruba 300 000 m³ materiálu.

1.1. Variant 3 - úplné odklonenie prietoku do meandra

Variant 3 reprezentuje spôsob sprietočnenia úplnou integráciou meandra do riečného systému odklonením celého prietoku do meandra. Počíta s obnovením pôvodnej šírky meandra a úplným prehradením hlavného toku. Geometria koryta je lichobežníkového tvaru so sklonom brehov 1:3, kótou dna 138.0 m n. m. a šírka dna 60 m. Riešenie by malo zabezpečiť obnovenie prirodzenej dynamiky riečnej morfológie. Podľa dostupných zdrojov patrí tento prístup medzi správne spôsoby revitalizácie [1][3]. Aby bolo toto opatrenie účinné, musí byť spojené s prehradením hlavného toku, na úroveň hladiny korytového prietoku. Prehradením toku zároveň vznikne slepé rameno so stojatou vodou, ktoré nahradí doterajší význam odrezaného meandra. Variant 3 vyžaduje vyčistenie väčšej časti nánosov a upravenie na pôvodné parametre pred generálnej úpravy toku Moravy [1]. Objem materiálu potrebného na odstránenie som vypočítal ako rozdiel výšky terénu aktuálneho stavu meandra a výšky terénu upraveného pre variant 3. Výsledná hodnota je zhruba 300 000 m³.

3. Okrajové podmienky modelu

3.1. Hydrologické údaje

Korytotvorný prietok je z geomorfologického hľadiska prietok, ktorý má najvýznamnejší vplyv na zmeny koryta. Na rieke Morava ide o prietok, ktorý pri najvyššej energii prúdu v koryte transportuje najväčšie množstvo sedimentov [3]. Podľa výsledkov merania transportu sedimentov, ale aj meraní na fyzikálnom modeli s pohyblivým dnom, bolo preukázané, že ku korytotvornému prietoku dochádza pri plnom koryte [1]. Na Morave bol stanovený korytotvorný prietok pre hodnotu 260 m³.s⁻¹. Bol odvodený z topografie a priebehu hladín z roku 1996 (VÚVH, 1998). Prietok pri plnom koryte však nie je rovnaký pre celý tok Moravy.

V niektorých úsekoch je hladina pri $260 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ príliš zahĺbená do koryta a nedosahuje maximálnu možnú energiu, v iných naopak dochádza k vybreženiu [3]. V mojej práci som pre korytotvorný prietok zvolil $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Hladina pri tomto prietoku spoľahlivo kopíruje brehovú čiary, vybreženie nastalo len lokálne na začiatku modelu na pravom brehu. V povodí Moravy je prietok $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 1 až 2 ročným maximom. Podľa hydrologických údajov SHMU z rokov 2004 až 2010 bol na vodomernej stanici Moravský Svätý Ján priemerný denný prietok $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ prekročený priemerne 17 dní za rok [4]. Je potrebné mať na zreteli, že v roku 2006 a 2010 boli na Morave dosiahnuté extrémne veľké povodňové prietoky. V prípade, ak neberiem do úvahy tieto povodňové udalosti, doba prekročenia uvažovaného korytotvorného prietoku je priemerne 10 dní za rok.

Okrajové podmienky modelu pre priemerný prietok $114,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sú 140,26 m n. m. na začiatku modelu a 139,94 m n. m. na konci modelu (Tab. 1). Okrajové podmienky modelu pre korytotvorný prietok $250,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sú 141,72 m n. m. na začiatku modelu a 141,44 m n. m. na konci modelu.

Tab. 1: Okrajové podmienky pre dané prietoky

| Prietok Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] | Začiatok modelu [m n. m.] | Koniec modelu [m n. m.] | D ₅₀ [mm] |
|--|---------------------------|-------------------------|----------------------|
| 114.00 | 140.26 | 139.94 | 0.208 |
| 250.00 | 141.72 | 141.44 | |

3.2. Granulometrické vstupné údaje

Morava je príkladom aluviálneho toku na piesočnatom substráte, s pomerne významnou mierou suspendovaného sedimentu. Granulometrická analýza nánosov na meandri preukazuje obsah stredne hrubých štrkov a piesku na vtoku a prevahu prachu na výtok. Vzorky z týchto lokalít boli odoberané sondami z viacerých horizontov (v hĺbke 0.7 až 1 m), vždy tam kde sa menil charakter materiálu. Rozsah zrnitosti vzoriek na vtoku je 0,35 až 7 mm, na výtoku 0.009 až 0.02 mm. Pre modelovaný meander som zvolil Engelund-Hansenovu rovnicu transportu sedimentov. Výpočet pohybu splavenín touto rovnicou vyžaduje voľbu jedného stredného rozmeru zrna D₅₀, ktorý je typický pre celý modelovaný úsek toku. Ako geometrický priemer mediánov všetkých vzoriek bola stanovená charakteristická hodnota D₅₀=0.208 mm (Tab. 2).

4. Parametre morfodynamického modelu

R2DM je hydrodynamický model s pohyblivým dnom, ktorý bol vyvinutý pre simulovanie hydromorfologických zmien riečného dna. Vyvinul ho Jose Vasquez a Robert Millar na Univerzite Britskej Kolumbie [5]. Existuje ako samostatný modul, ktorý je postavený na — a úzko prepojený s hydrodynamickým modelom R2D. Model rieši dvojrozmernú rovnicu zachovania objemu splavenín. Transport jemného suspendovaného materiálu ignoruje [6]. Lokálne vymiešanie spôsobené turbulentným trojrozmerným prúdením ním nie je možné simulovať. Model disponuje algoritmom korekcie sekundárneho prúdenia a modelom transportu zmiešaných frakcií sedimentu. Model bol overený v laboratórnych podmienkach na experimentálnych korytách [7][8].

4.1. Transport splavenín

Na výpočet transportu splavenín disponuje model R2DM piatimi rovnicami: Meyer-Peter Müller, Kassem & Chaudrey, Van Rijn, Wilcock & Crowe a Engelund-Hansen. Každá z nich je vhodná na použitie len pre určitý rozsah zrnitosti [8]. Objem splavenín je premennou v dvojrozmernej rovnici

zachovania objemu splavenín, z ktorej je vypočítaná zmena výšky dna v čase pre daný výpočtový uzol. Pre riešený problém bol použitý vzťah Engelund-Hansen (1967). Engelund-Hansenova rovnica transportu splavenín bola odvodená výlučne z pozorovaní na experimentálnych korytách pre štyri zrnitosti D_{50} (0.19, 0.27, 0.45 a 0.93 mm) [9]. Objem transportovaných splavenín q_s (1) závisí od bezrozmerného tangenciálneho napätia τ^* (2). Korytový substrát by mal mať minimálny priemer zrna 0.15 mm a nemal by mať širokú variabilitu frakcií okolo mediánu D_{50} [8].

$$q_s = \frac{0.05C^2}{g} \sqrt{g(s-1)D_{50}^3} \tau^{*1.5} \quad (1)$$

$$\tau^* = \frac{u^2 + v^2}{C^2(s-1)D_{50}} \quad (2)$$

kde:

s = špecifická tiaž

g = gravitačná konštanta

C = Chézyho rýchlostný súčiniteľ

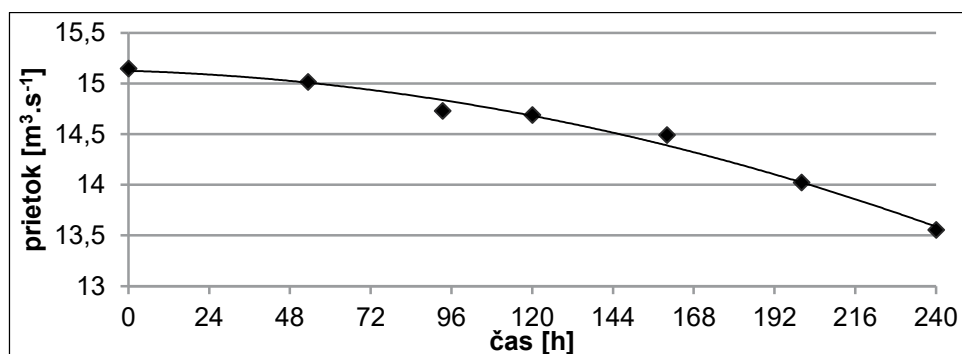
τ^* = bezrozmerné tangenciálne napätie (Shieldov parameter)

D_{50} = stredná hodnota zrnitosti

5. Výsledky simulácie

5.1. Variant 1 - minimalistické sprietočnenie meandra

Najvýznamnejšie morfológické zmeny nastali na prvých 150 až 200 m vtokového kanálu. Utvorili sa tu nánosy do výšky 1 až 1.5 m. Objem usadenín pre vtokový kanál som určil ako rozdiel digitálneho modelu terénu vtoku pred a po simulácii. Vplyvom pôsobenia korytotvorného prietoku sa počas simulovaných 10 dní, čo predstavuje 1 rok, vo vtokovom kanáli usadilo celkovo 2630 m³ materiálu (~4 t). Táto morfológická zmena má vplyv aj na prietokové pomery. Prietok klesol z pôvodných 15,14 m³.s⁻¹ na 13,7 m³.s⁻¹, čo zodpovedá poklesu o 10 % za hydrologický rok (Graf 1). Zmenšenie kapacity vtoku taktiež zapríčinilo neprietočnosť meandra pri priemerných prietokoch, čím sa stala nesplnenou jedna zo základných podmienok návrhu. Variant 1 je podobným riešením ako spôsob sprietočnenia v projekte GEF, kedy bol meander prepojený s hlavným tokom len na 1/5 svojej pôvodnej šírky a po prvej povodňovej udalosti sa zanesol [1].

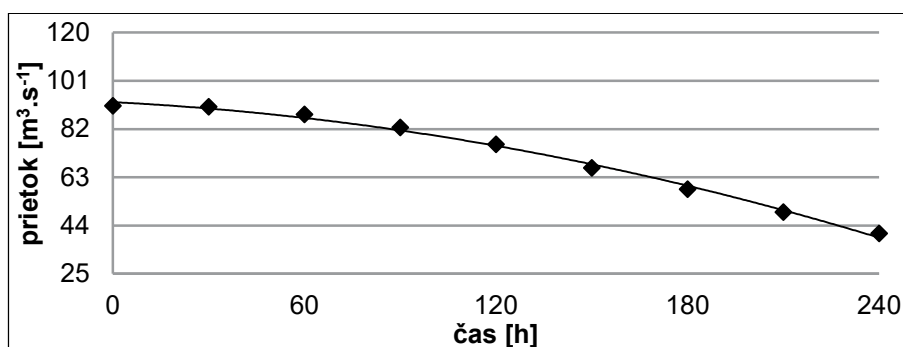


Graf 1: Pokles prietoku v čase spôsobený zanesením vtoku

5.2. Variant 2 - sprietočnenie meandra na plnú šírku

Podobne ako pri variante 1 nastali najvýznamnejšie morfológické zmeny vo vtoku. Na hranici vtoku do meandra a hlavného toku sa utvoril masívny nános do výšky až 2.5 m a výmoľ hĺbky 2 až 3.5 m.

Objem usadenín pre vtokový kanál som určil ako rozdiel digitálneho modelu terénu vtoku pred a po simulácii. Vplyvom pôsobenia korytotvorného prietoku sa počas simulovaných 10 dní vo vtokovom kanáli usadilo celkovo 17 500 m³ materiálu (~26,5 t). Táto morfológická zmena má vplyv aj na prietokové pomery. Prietok klesol z pôvodných 91.1 m³.s⁻¹ na 40.8 m³.s⁻¹, čo zodpovedá poklesu o 55 % (Graf 2). Meander napriek značnému poklesu prietokovej kapacity ostal prietokový pre priemerný prietok, avšak tendencia intenzívneho zanášania poukazuje na skoré uzavretie vtoku. Variant 2 poukazuje na skutočnosť, že prepojenie meandra s hlavným tokom plnou pôvodnou šírkou nie je, ani v prípade, že sú všetky nánosy v z meandru odstránené, dostačujúce.



Graf 2: Pokles prietoku v čase spôsobený zanesením vtoku

5.3. Variant 3 - úplné odklonenie prietoku do meandra

Variant 3 reprezentuje podľa dostupných zdrojov [1][3] správny spôsob revitalizácie. Prostredníctvom modelu je možné simulovať vplyv revitalizačného opatrenia na zmenu členitosti dna a trend vývoja morfológie koryta. Počas 10 dní simulovaného korytotvorného prietoku, čo predstavuje zhruba jeden hydrologický rok, dochádza k zmene z aktuálne lichobežníkového tvaru, na tvar blížiaci sa prirodzenému riečnemu korytu. Úplnou integráciou meandra do riečneho systému sú vytvorené podmienky pre prirodzenú tvorbu korytových útvarov. Prognóza vývoja koryta poukazuje na vytváranie striedavých úsekov brodov a zdrží, vrcholových lavíc, laterálnych lavíc ako aj na striedajúce sa oblasti rýchleho a pomalého prúdenia. Koryto svojou členitosťou poskytuje podmienky pre vývoj pestrého zastúpenia biotopov v porovnaní s aktuálnym uniformným korytom [10]. Vtok do slepého ramena, vytvoreného prehradením hlavného toku je naďalej prietokový a minimálne zanesený. Priaznivý vývoj v tejto oblasti je zdôvodniteľný polohou vtoku v konkáve nového hlavného koryta. Slepé rameno tak môže dlhodobo suplovať úlohu odrezaného meandru so stojatou vodou.

6. Záver

Simulácia na modeli s pohyblivým dnom preukázala, že počas 10 dní, čo predstavuje jeden hydrologický rok nastáva významný morfológický vývoj. Vo vtokovom kanáli variantu 1 sa celkovo usadilo 2630 m³ (~4 t) materiálu, čo zapríčinilo pokles prietoku v meandri z pôvodných 15,14 m³.s⁻¹ na 13,7 m³.s⁻¹ (pokles o ~10 %) a neprietoknosť pri priemerných prietokoch. Pomocou modelu som preukázal, že posudzovaný návrh sprietočnenia meandru je nevhodný, pretože jeho morfológická stabilita je v daných podmienkach neudržateľná. Pri variante 2, došlo k zaneseniu vtoku 17 500 m³ (~26.5 t) materiálu, čo spôsobilo pokles prietoku v meandri z pôvodných 91,1 m³.s⁻¹ na 40,8 m³.s⁻¹

(pokles o ~55%). Tento variant je vzhľadom na nutnosť vyťaženia nánosov v objeme zhruba 300 000 m³ a morfolologickej neudržateľnosti vpustu spomedzi posudzovaných variantov najnevhodnejší.

Variant 3 počíta s úplným odklonením prietoku do meandra prehradením pôvodného toku a vyťažením pôvodných nánosov z meandra v objeme zhruba 300 000 m³. Počas 10 simulovaných dní došlo k vytvoreniu prirodzených korytových útvarov, brodov a zdrží, laterálnych lavíc, vrcholových lavíc a k striedaniu úsekov s rýchlym a pomalým prúdením. Realizáciou tohto variantu by došlo k výraznému zvýšeniu členitosti koryta porovnaní s momentálnym stavom a vytvoreniu podmienok pre vznik nových biotopov.

7. PodĎakovanie

Článok vznikol vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Tento článok vznikol aj na základe finančnej podpory projektu grantovej agentúry VEGA 1/0361/17.

8. Literatúra

- [1] HOLUBOVÁ K., Slovensko-rakúsky úsek Moravy - Morfologický vývoj vo vzťahu k revitalizácii rieky, 2010
- [2] Global Environment Facility, Slovak Republic Biodiveristy protection project, 1994
- [3] HOLUBOVÁ K., LUKÁČ M., ČOMAJ M., MRAVCOVÁ K., ČUBAN R., POLÁK V., REBENDA F., HRANKOVÁ R., MoRe Štúdia uskutočniteľnosti, VÚVH, 2013
- [4] SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV, Hydrologická ročenka - povrchové vody, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010
- [5] VASQUEZ J., Two-Dimensional Finite Element River Morphology Model, 2005
- [6] MATHIAS KONDOLF, Tools in Fluvial Geomorphology, 2003
- [7] STEFFLER P., BLACKBURN J., Introduction to Depth Averaged Modeling and User's Manual, 2002
- [8] KWAN S., River2DM user Guide, 2011
- [9] HABERSACK H., HENGL M., HUBER B., LALK P., TRITTHART M., Fließgewässermmodellierung – Arbeitsbehelf Feststofftransport und Gewässermorphologie, 2011
- [10] GHANEM A., STEFFLER P., HICKS F., KATOPODIS C., Two-Dimensional Simulation of Physical Habitat Conditions in Flowing Streams, 1996

Lucia Bytčanková¹

Študijný program: vodohospodárske inžinierstvo, ročník: 2

VPLYV TVAROV VTOKOVÉHO OBJEKTU NA SÚBEŽNÝ CHOD TURBÍN PRIHAŤOVEJ MVE

THE EFFECT OF SHAPES OF THE INTAKE STRUCTURE ON THE SIMULTANEOUS OPERATION OF TURBINES OF A LOW PRESSURE SHPP

Abstract

Inlet structures are an important part of small hydropower plants. The flow quality is significantly influenced by the flow homogeneity in the inlets, as the inhomogeneous flow velocity distribution has a negative impact to the operation of the hydropower plants. The paper describes the flow assessment in the inlets of a low pressure small hydro power plant (the Stará Ľubovňa small hydropower plant) with respect to the flow homogeneity. The River2D, 2D numerical modelling software, has been used for evaluation of flow in the inlets. The simulations proved the negative impact of the construction solution for the flow conditions in the inlets. This appears mostly in profiles of coarse racks and screenings where is a significant unequal distribution of flow and significant deviation in flow velocities from the recommended values.

Kľúčové slová

Vtokové objekty, nízkotlaková malá vodná elektrárňa, matematické modelovanie prúdenia, homogenita prúdenia.

1. Úvod

Jednou z najdôležitejších stavebných častí malých vodných elektrární (MVE) sú vtokové objekty, ktoré priamo súvisia s celou funkciou elektrárne. Vtokové objekty sú napojené na vodnú nádrž alebo zdrž a odoberajú z nej vodu do elektrárne. Hydraulicky vhodný návrh vtokového objektu je spojený s dosiahnutím požadovaných parametrov vodnej elektrárne. Správne navrhnutie vtokového objektu zaisťuje dostatočný prietok vody a mal by zabezpečiť minimálne tlakové straty prúdenia [3].

Veľký vplyv na kvalitu prúdenia má homogenita rýchlostného poľa na vtoku do turbíny. Nehomogénne rozdelenie rýchlostí prúdenia spôsobuje negatívne účinky na výkon turbíny ako je zníženie jej účinnosti alebo nerovnomerné mechanické zaťaženie častí turbíny, čo má za následok zníženie jej životnosti. Z dôvodu zníženia nákladov na projekt, nie sú tvary vtokových objektov malých vodných elektrární s priamoprúdovými turbínami často hydraulicky správne navrhnuté. Táto skutočnosť vedie k prevádzkovým problémom takýchto MVE [6,7].

Problematiku prúdenia vtokových objektov je možné riešiť napríklad pomocou fyzikálnych modelov, 2D alebo 3D modelovaním. Rozvíjajúce sa možnosti meraní umožnili vznik objektívnych kritérií, ktoré hodnotia interakciu medzi objektami vodnej elektrárne a turbínou. Metodika prúdenia nízkotlakových MVE vychádza z východiskových bodov autorov Fishera a Frankeho. Otázky, ktoré sa týkajú prietokových podmienok väčšinou súvisia s nízkotlakovými prihaťovými elektrárnami. Táto metóda sa významne aplikuje na výsledkoch matematických modelov [6,7].

¹ Lucia Bytčanková, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Článok popisuje vyhodnotenie prúdenia vo vtokovom objekte nízkotlakovej malej vodnej elektrárne. Na posúdenie prúdenia bol vytvorený 2D matematický model prúdenia, ktorý by mal pomocou nástrojov 2D modelovania preukázať vhodnosť a možné problémy vtokových objektov a ich stavebného riešenia.

2. Materiál a metódy

Predmetom analýzy vhodnosti návrhu vtokového objektu pre homogénne rozdelenie rýchlostí prúdenia bola MVE Stará Ľubovňa, malá vodná elektráreň s priamoprúdovými turbínami. Malá vodná elektráreň Stará Ľubovňa sa nachádza pri meste Stará Ľubovňa na rieke Poprad. Hať je zložená z dvoch haťových polí, ktoré sú hradené hydraulickými klapkami. Riadiaci systém MVE a hate udržiava úroveň prevádzkovej hladiny 520,54 m n.m., na ktorú je navrhnuté hradenie. Regulácia je vykonávaná pomocou ľavého poľa hate, cez ktorý je možné pustiť prietok až $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pri prevedení väčších prietokov musia byť použité obe haťové polia [1,2].

Budova MVE sa nachádza na ľavom brehu toku. Obsahuje dve Kaplanove turbíny, ktoré sú schopné spracovať prietok od $2,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do $19,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Návrhový prietok elektrárňou je $18,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a návrhový spád je 3,16 m. Dve turbíny majú DN 1 290 mm a maximálny výkon pri prietoku $18,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ je 510 kW [1,2].



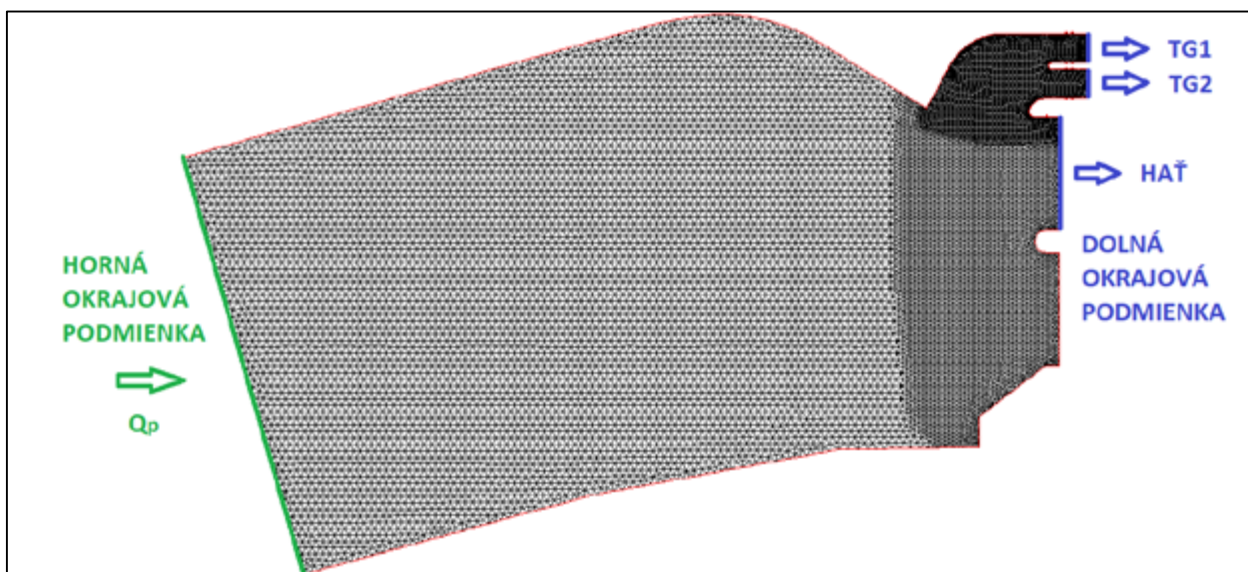
Obrázok 1: MVE Stará Ľubovňa [2]

2D matematický model prúdenia MVE Stará Ľubovňa bol vytvorený v programe River2D. River2D je voľne šíriteľný softvér na simuláciu prírodných tokov, v ktorom je možné uskutočňovať výpočty ustáleného a neustáleného prúdenia. Je to dvojrozmerný model, ktorý využíva rovnicu zákona zachovania hmotnosti a zachovávanie hybnosti [4].

Geometria bola vytvorená z poskytnutých údajov o nadmorských výškach v okolí stavby. Dno toku je jednotné, bez sklonu dna, vtokový objekt do elektrárne bol modelovaný na reálnu situáciu. V modeli bola použitá hodnota súčiniteľa drsnosti podľa Manninga 0,025, ktorá popisuje priame pravidelné koryto so štrkovým dnom [3].

Okrajová podmienka na vtoku (horná okrajová podmienka) bola určená zadaním prietoku, ktorý vteká do modelovanej oblasti. Okrajová podmienka na výtoku (dolná okrajová podmienka) bola stanovená kótou nadmorskej výšky hladiny (Obrázok 2).

V simuláciách boli menené okrajové podmienky výpočtu, aby priblížili rôzne varianty fungovania prevádzky MVE. Horná okrajová podmienka je označená Q_p a vo výpočtoch boli použité prietoky $18,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Dolná okrajová podmienka určuje prevádzkovú hladinu $520,54 \text{ m n.m.}$, ktorá bola menená na základe zvoleného scenára. Dolnou okrajovou podmienkou bola stanovená Kaplanova turbína TG1, Kaplanova turbína TG2 a ľavostranná klapka hate označovaná HAĎ (Tabuľka 1).



Obrázok 2: Modelovaná výpočtová sieť s okrajovými podmienkami [5]

Tabuľka 1: Prehľad simulovaných scenárov s uvedenými okrajovými podmienkami [5]

| Scenár | Horná okrajová podmienka [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] | Dolná okrajová podmienka [m n.m.] | | | Vypočítaný prietok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] | | |
|--------|--|--------------------------------------|---------|---------|--|------|------|
| | Q_p | TG1 | TG2 | HAĎ | TG1 | TG2 | HAĎ |
| A | 18,2 | 520,54 | 520,54 | - | 10,6 | 7,5 | - |
| B | 18,2 | 520,54 | 520,524 | - | 9,1 | 9,1 | - |
| C | 9,1 | 520,54 | - | - | 9,1 | - | - |
| D | 100 | 520,54 | - | 520,54 | 13,8 | - | 86,2 |
| E | 100 | 520,54 | - | 520,47 | 9,1 | - | 90,9 |
| F | 9,1 | - | 520,54 | - | - | 9,1 | - |
| G | 100 | - | 520,54 | 520,54 | - | 19,4 | 80,6 |
| H | 100 | - | 520,54 | 520,392 | - | 9,1 | 90,9 |
| I | 100 | 520,54 | 520,54 | 520,54 | 14,7 | 15 | 70,3 |
| J | 100 | 520,493 | 520,54 | 520,429 | 9,1 | 9,1 | 81,8 |

Výsledky simulácii boli vyhodnotené v profiloch vtokov do turbín (profily jemných hrabíc), kde bolo vyhodnotené rozdelenie rýchlostí prúdenia prierezom prúdu. Zvislicové rýchlosti v tomto profile boli porovnané s priemernou zvislicovou rýchlosťou v profile vtoku do turbín. Porovnanie je vyjadrené percentuálnou relatívnou odchýlkou rýchlostí prúdenia od priemernej zvislicovej rýchlosti.

Simulácie prebiehali výpočtom ustáleného prúdenia. Na posúdenie boli vybrané prietoky $18,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Prietok $18,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ predstavuje návrhový prietok elektrárňou. Pri rovnomernom

rozdelení tohto prietoku, by turbína mala byť schopná spracovať prietok $9,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Prietok $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ určuje prietok, ktorý je ustálený a nespôsobuje pohyb dnového materiálu. Pri zvýšení tohto prietoku sa prietok považuje za povodňový. Prevádzková hladina bola stanovená manipulačným poriadkom na kótu 520,54 m n.m. V scenároch bola upravovaná dolná okrajová podmienka hladiny z dôvodu rovnomerného rozdelenia prietoku do turbín. Tolerancia prevádzkovej hladiny je $\pm 80 \text{ mm}$ [1].

3. Výsledky a diskusia

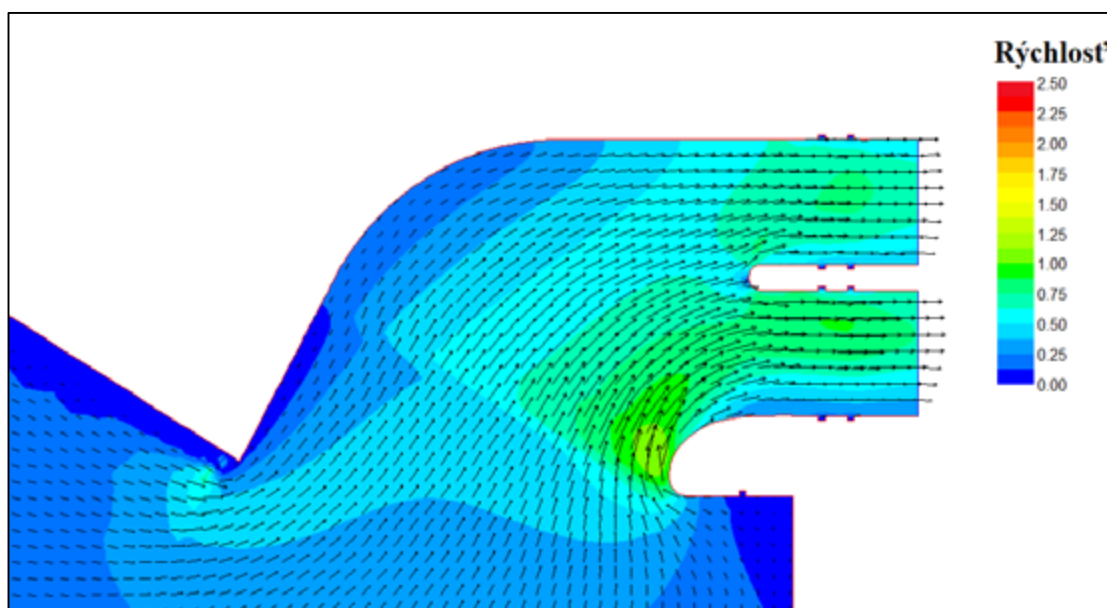
Simulovaných bolo 10 scenárov. V scenároch A, C, D, F, G, I prebiehali prvotné výpočty modelu. Na základe prerozdelenia prietokov boli upravované hladiny, až kým prerozdelenie prietokov nebolo rovnomerné pre turbíny s maximálnou hltnosťou $9,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Výsledné prerozdelené vypočítané prietoky sú uvedené v Tabuľke 1.

Scenáre B a J simulujú súčasný stav prevádzky vo vtokoch do turbín s rôznymi okrajovými podmienkami. Oba scenáre boli vybrané na hodnotenie rozdelenia rýchlostí prúdenia vo vtokoch do turbín. Výsledné rozdelenia rýchlostí prúdenia sú znázornené na obrázkoch 3 a 5. Z výsledkov sú zrejmé nerovnomerné rozdelenia rýchlostí prúdenia vo vtokovom objekte. Tvar vtokového objektu výrazne ovplyvňuje prúdenie, nakoľko v určitých miestach vtokového objektu sa vyskytuje prúdenie s opačným smerom. Táto deformácia prietokového poľa ovplyvňuje rozdelenie rýchlostí vo vstupe do turbín (profily jemných hrablic), kde sa v priereze vyskytujú významné odchýlky rýchlostí prúdenia (Obrázok 4, 6).

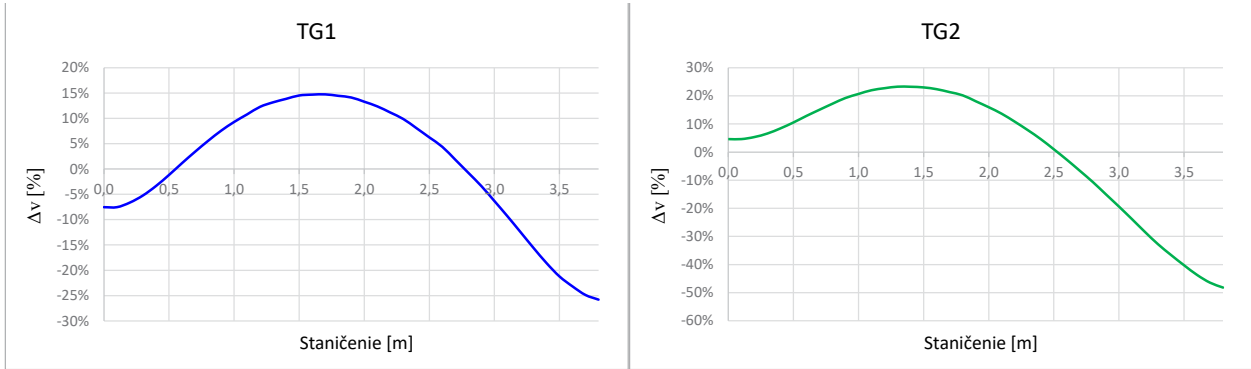
Scenár B

Okrajové podmienky:

- $Q_p = 18,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (prítok)
- TG1 = 520,54 m n.m., $9,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (nadmorská výška, odtok)
- TG2 = 520,524 m n.m., $9,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (nadmorská výška, odtok)



Obrázok 3: Rozdelenie rýchlostí prúdenia [5]

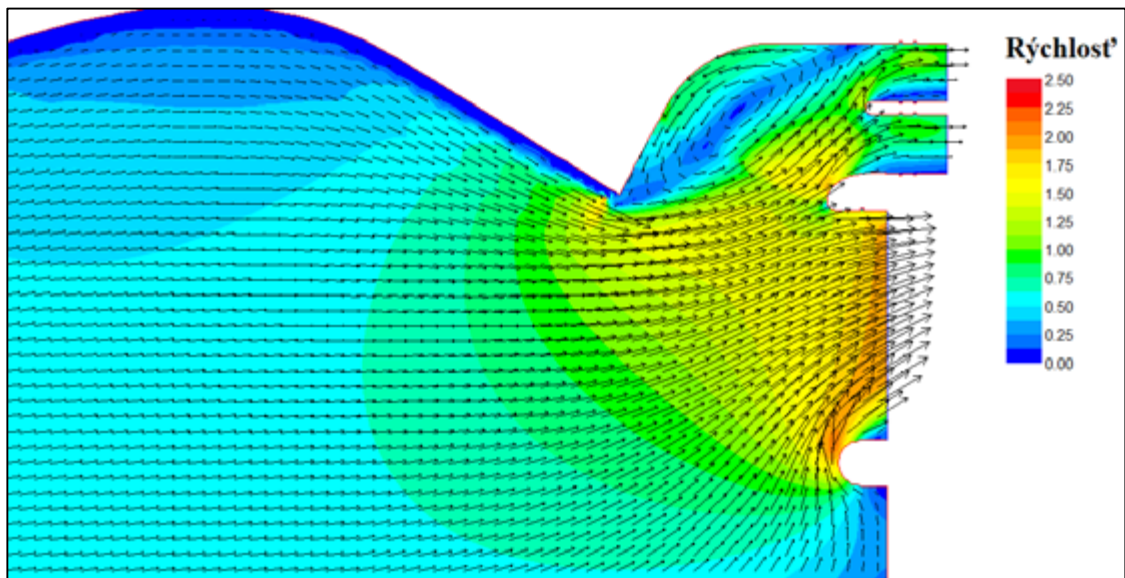


Obrázok 4: Relatívna odchýlka rýchlostí prúdenia od priemernej zvislicovej rýchlosti v profile jemných hrabíc

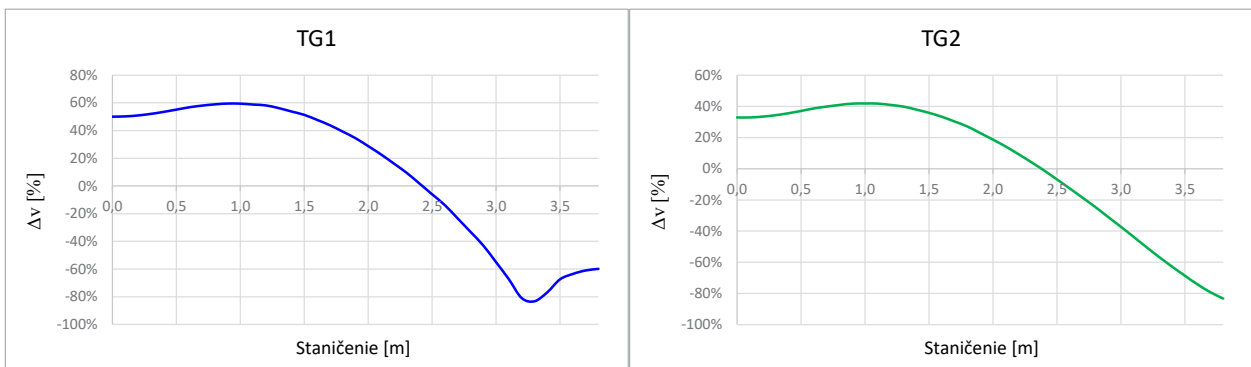
Scenár J

Okrajové podmienky:

- $Q_p = 100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (prítok)
- TG1 = 520,493 m n.m., $9,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (nadmorská výška, odtok)
- TG2 = 520,54 m n.m., $9,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (nadmorská výška, odtok)
- HAĽ = 520,429 m n.m., $81,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (nadmorská výška, odtok)



Obrázok 5: Rozdelenie rýchlostí prúdenia [5]



Obrázok 6: Relatívna odchýlka rýchlostí prúdenia od priemernej zvislicovej rýchlosti v profile jemných hrabíc

4. Záver

Článok popisuje problematiku prúdenia a vhodnosť návrhu vtokových objektov nízkotlakových malých vodných elektrární s priamoprúdovými turbínami pomocou 2D matematického modelu.

Aplikácia tejto metódy na MVE Stará Ľubovňa dokázala, že vo vtokoch do turbín je výrazné nerovnomerné rozdelenie rýchlostí prúdenia. Obrázky 4 a 6 znázorňujú relatívne odchýlky rýchlostí prúdenia od priemernej zvislicovej rýchlosti v profile jemných hrablic. Relatívne odchýlky rýchlostí prúdenia sa pohybujú v rozmedzí od + 60% do – 90%, čo dokazuje veľkú nehomogenitu prúdenia, ktorej je táto oblasť vystavená. Realizované simulácie dokázali, že nielen podmienky prúdenia, ale aj tvary vtokového objektu negatívne ovplyvňujú prúdenie, čo má za následok nerovnomerné rozdelenie rýchlostí prúdenia do turbín.

Dodatočné stavebné úpravy alebo rekonštrukcia stavby by mali napomôcť k zlepšeniu parametrov prúdenia.

PodĎakovanie

Tento článok vznikol aj na základe finančnej podpory projektu grantovej agentúry VEGA 1/0361/17.

Literatúra

[1] LAHKÝ, J. *Manipulačný poriadok pre trvalú prevádzku vodnej stavby Malá vodná elektráreň Stará Ľubovňa na rieke Poprad*, 2014

[2] ASB.sk, MVE Hronská Dúbrava a Stará Ľubovňa [online, prístupné dňa 30.11.2012, <https://www.asb.sk/inzinierske-stavby/vodohospodarske-stavby/mve-hronska-dubrava-a-stara-lubovna>]

[3] HODÁK, T. *Využitie vodnej energie*. STU v Bratislave, 1984

[4] STEFFLER, P., BLACKBURN, J. *River2D Two-Dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat*, 2002

[5] BYTČANKOVÁ, L.: *Posúdenie prúdenia vo vtokovom objekte MVE Stará Ľubovňa*. 2018

[6] 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

[7] ZHAO, Y. P., LIAO, W. L., FENG, H. D., RUAN, H., LUO, X. Q.: *Experimental and numerical study on inlet and outlet conditions of a bulb turbine with considering free surface*. 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems. Beijing, China, 2012

Réka Csicsaiová¹

Študijný program: názov, ročník: Vodohospodárske inžinierstvo, 3. ročník

HYDRAULICKÉ POSÚDENIE KANALIZAČNÉHO ZBERAČA

HYDRAULIC ASSESSMENT OF SEWER COLLECTOR

Abstract

This study aims to point out the negative impact of the development of urbanized areas on the infrastructure of sewer networks. A significant increase in hard surfaces in towns leads to the concentration of surface runoff. However, due to climate change, the occurrence of tidal rainfall is increasing, and the sewerage network is unable to receive and drain it. As a result, there are local floods and urban floods. The study is focused on the hydraulic assessment of sewer networks in the area of interest Trnava - north. We evaluated two variants with different rain frequencies. At the periodicity P 0.5, the number of unsatisfactory sections is 83. At a periodicity of 0.2, 17 network sections overloaded by more than 500%.

1. Úvod

Posledné desaťročia sú charakterizované migráciou slovenského obyvateľstva do miest. To spôsobilo rozvoj mestskej infraštruktúry a vysoký stupeň urbanizácie. Nepriaznivými vplyvmi urbanizácie na prírodné prostredie miest jednoznačne patrí nárast množstva nepriepustných plôch [1].

Pre mestské povodia znamená nárast nepriepustných plôch zmenu hydrologických charakteristík, zintenzívnenie povrchového odtoku a zmeny v mikroklimáte mesta [2], [3]. Povrchový odtok z mestských povodí je možné charakterizovať ako hlavný zdroj znečistenia recipientu počas privalových dažďov [4].

Zaužívaný spôsob nakladania s dažďovými vodami v mestách bol založený na koncepcii najrýchlejšieho odvedenia dažďových vôd z urbanizovaného územia. Táto koncepcia sa však časom prejavila ako nedostačujúca [5]. Dôsledkom klimatických zmien vznikajú situácie, keď už stokové siete nie sú schopné plniť svoju funkciu.

Väčšina slovenských miest a obcí má vybudované jednotnú stokové siete, ktoré v dobe návrhu a výstavby spĺňali požadovaný účel. Postupom času však došlo k nárastu počtu pripojených obyvateľov na jednotlivé časti stokových sietí a nárastu plochy daného kanalizačného povodia.

V súčasnosti sa dostávame do obdobia, keď už kapacita existujúcich stokových sietí je nedostačujúca a je nutné ich posúdenie na rôzne zrážkové záťaže.

Cieľom štúdie je posúdiť hydraulickú kapacitu stokovej siete v mestskom povodí záujmového územia v severnej časti mesta Trnava. Posúdenie sa zameriava na vyhodnotenie situácií s rôznymi periodicitami dažďa. Vypracovanie spočíva v namodelovaní súčasného stavu posudzovanej stokovej siete a následné zaťažovanie tejto siete niekoľkými blokovými dažďami.

¹ Réka Csicsaiová, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra zdravotného a environmentálneho inžinierstva, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Materiál a metódy

2.1 Charakteristika záujmového územia

Mesto Trnava leží na kraji Západoslovenskej nížiny, severovýchodne od Bratislavy. Rozloha mesta je takmer 71,54 kilometrov štvorcových, a člení sa na 6 mestských častí: Trnava stred, Trnava východ, Trnava sever, Trnava západ, Trnava juh a Modranka [6]. Počet obyvateľov je 65 207 (31.12.2018) a hustota osídlenia je 911,48 obyv. / km².

Mesto má vybudovanú jednotnú stokovú sieť, ktorá slúži na odvádzanie splaškových, priemyselných a dažďových vôd do čistiarne odpadových vôd (ČOV) Trnava - Zeleneč. Ako recipient sa využíva potok Trnávka, ktorý preteká mestom zo severu na juh.

Stokovú sústavu tvorí hlavný kanalizačný zberač vedený po pravom brehu Trnávky, ktorý odvádzá odpadové vody z vetiev B a A v južnej časti, do ČOV Trnava- Zeleneč. Zberače I, II, III, V, v strednej časti intravilánu. Zberače D, C odvodňujúce východnú časť intravilánu do odľahčovacej komory OK 010, zberače A9a, AN2, AN odvodňujúce východnú časť do odľahčovacej komory OK 01 AN a zberače B, G pre západnú časť intravilánu. Na celej stokovej sieti je vybudovaných 20 odľahčovacích komôr, ktoré odľahčujú dažďovú vodu do recipientu Trnávka. Celková dĺžka kanalizačnej siete je 111,236 km.

Súčasťou mestskej časti Trnava sever je obytná štvrť Kopánka, sídliská Vodáreň a Zátvor, areál trnavského cukrovaru a priemyselná zóna na trstínskej ceste. Časť kanalizačnej siete ktorú sme posudzovali pozostáva zo zberačov C, D, a VD, ktoré odvádzajú odpadové vody z obytnej štvrť Kopánka a časti sídliska Zátvor. Koniec posudzovanej kanalizačnej siete je v odľahčovacej komore OK 010.

Podklady k tejto štúdií boli poskytnuté v podobe projektovej dokumentácie firmou TAVOS a.s., ktorá prevádzkuje predmetnú kanalizáciu. Predmetná posudzovaná časť kanalizačnej siete zodpovedá spadovej oblasti jednej odľahčovacej komory, ktorú môžeme vidieť na obrázku č.1.



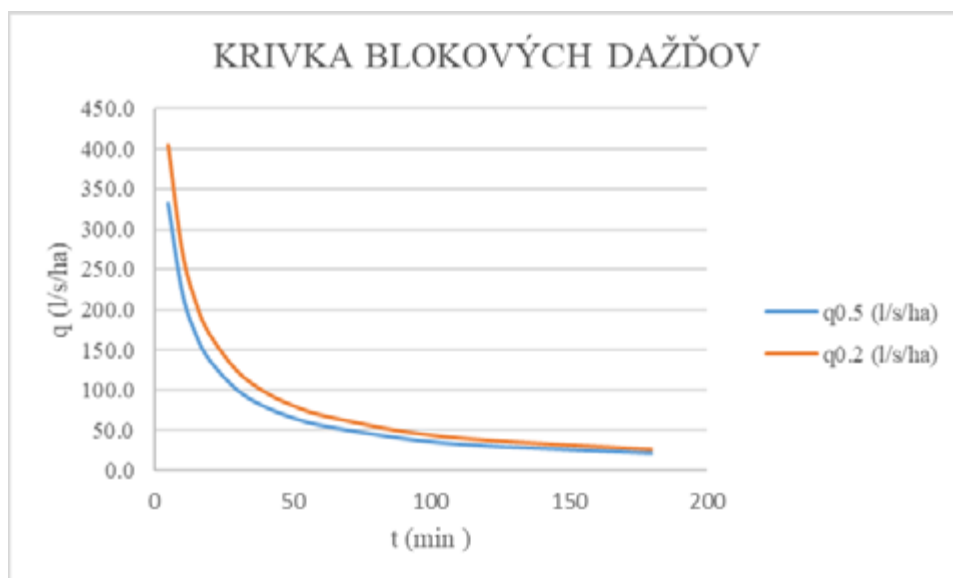
Obrázok 1: Vyústenie z odľahčovacej komory OK 010 a mapa záujmového územia Trnava – sever

2.2 Výpočet blokového dažďa pre záujmové územie mesta Trnava

Matematické vyjadrenie kriviek blokových dažďov vypočítame na základe údajov o blokových dažďoch Slovenska, ktoré stanovili Šamaj a Valovič (1973) a pomocou rovnice na výpočet výdatnosti blokových dažďov publikovanou v roku 1979 Učíkanom a Horváthom (1). Pre posúdenie vplyvu zvyšovania intenzity na preťaženosť kanalizačnej siete sme zvolili blokové dažde s periodicitou $p = 0,2; 0,5$. Priebeh blokových dažďov je znázornený na obrázku č. 2.

$$q = K(t^a + B)^{-1} \quad (1)$$

Kde: K, B, a sú lokálne parametre blokových dažďov (Šamaj a Valovič 1973), q je výdatnosť blokového dažďa ($l\ s^{-1}ha^{-1}$), t je trvanie blokového dažďa (min).



Obrázok 2: Krivka blokových dažďov pre mesto Trnava

2.3 Posúdenie stokovej siete

Posúdenie stokovej siete bolo vykonané pomocou programu SeWaCAD, ktorý je softwarový nástroj používa sa pri dimenzovaní a posudzovaní jednotnej alebo delenej stokovej siete. Jedným z najdôležitejších krokov bolo určenie odtokových súčiniteľov zodpovedajúcich povrchovej úprave danej lokality.

V okolí posudzovaných zberačov tvoria terén zastavané plochy, vozovky a podobné spevnené plochy, ihriská a zelené pásy. Súčinitele odtoku ψ boli určené na základe typu a hustoty zástavby. Tabuľka č. 1 znázorňuje rozdelenie územia do štyroch skupín podľa súčiniteľa odtoku.

Tabuľka 1: Súčinitele odtoku ψ

| Skupina | Koeficient ψ |
|--------------------------|-------------------|
| Nezastavané plochy | 0,2 |
| Riedko zastavané plochy | 0,35 |
| Stredne zastavané plochy | 0,6 |
| Husto zastavané plochy | 0,8 |

Prvým krokom pri posudzovaní stokovej siete je implementácia vstupných údajov do softvéru. Základným vstupným údajom bola situácia existujúcej stokovej siete, ktorá bola vykreslená na základe poskytnutých údajov v programe AutoCad a následne sa importovala do programu SeWaCAD. Na obrázku 3 je možné vidieť hydrotechnickú situáciu stokovej siete záujmového územia.



Obrázok 3: Hydrotechnická situácia stokovej siete záujmového územia

3. Výsledky

Periodicite zrážok $P = 0,5$ zodpovedá zrážková udalosť vyskytujúca sa raz za dva roky. Pri posúdení sa zistilo, že pri danom modelovom daždi s touto periodicitou je preťažených až 83 úsekov a 100 úsekov je vyhovujúcich.

Z celkovej dĺžky posudzovanej stokovej siete (24,7 km) je 11,1 km (44,9%) preťažených stôk a 13,6 km (55,1 %) vyhovuje posúdeniu. Obrázok 4 prezentuje situáciu preťaženia stokovej siete. Zelené úseky predstavujú stoky, ktoré sú preťažené 100 – 150%, ružové úseky sú preťažené 150 – 250%, červené 250-500% a žlté úseky predstavujú najviac preťažené stoky (>500%). Celková dĺžka preťažených stôk je 11,1 km. Dĺžka úsekov s preťažením od 100 – 150 % je 1,5 km, s preťažením od 150 – 250 % 3,6 km, preťaženiu od 250 – 500 % zodpovedá dĺžka 5,4 km a dĺžka preťažených úsekov nad 500% je 0,72 km.



Obrázok 4: Situácia preťaženia posudzovanej stokovej siete pri periodicite $P=0,5$

Periodicite $P = 0,2$ zodpovedá zrážková udalosť vyskytujúca sa raz za päť rokov. Pri modelovom daždi s touto periodicitou je preťažených 90 úsekov a 93 úsekov je vyhovujúcich. Z celkovej dĺžky posudzovanej stokovej siete 24,7 km je 11,4 km (46,1%) preťažených a 13,3 km (53,9%) vyhovujúcich. Dĺžka úsekov s preťažením od 100 – 150 % je 0,63 km, s preťažením od 150 – 250 % 2,8 km, preťaženiu od 250 – 500 % zodpovedá dĺžka 6,3 km a dĺžka preťažených úsekov nad 500% je 1,7 km.



Obrázok 5: Situácia preťaženia posudzovanej stokovej siete pri periodicite $P=0,2$

4. Záver

Aktuálnym celosvetovým trendom je rozvoj urbanizovaných území a tým sa naskytuje nutnosť efektívneho riešenia odvádzania a zachytávania dažďových vôd v rámci rozvoja inteligentných miest. Vysoká miera urbanizácie spôsobuje nedostatok priepustných plôch, ktoré zabezpečujú zníženie koeficienta povrchového odtoku a maximálneho povodňového prietoku. Záverom práce bolo hydraulické posúdenie kanalizačnej siete v záujmovej oblasti Trnava – sever. Analyzovali sa postupne dažde s menšou periodicitou, čím narastala intenzita a pomocou programu SeWaCAD sa vykreslil vplyv jednotlivých dažďov na preťaženosť posudzovanej stokovej siete. Porovnávali sa vplyvy dažďov s periodicitou 0,5 a 0,2. Pri periodicite $P = 0,5$ bolo 8 úsekov siete preťažených o viac ako 500% a pri periodicite $P = 0,2$ bolo preťažených až 17 úsekov siete.

PodĎakovanie

Príspevok vznikol vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja. Táto práca bola tiež podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-18-0203 a Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVaŠ SR a SAV projekt č. 1/0574/19.

Literatúra

- [1] Niyogi, D. , Lei, M. , Kishtawal, C. , Schmid, P. , Shepherd, M., 2017. Urbanization impacts on the summer heavy rainfall climatology over the eastern United States. *Earth Interactions*, 21 (5), DOI: 10.1175/EI-D-15-0045.1.
- [2] Gao, B., Gao, L., Xu, D., Zhang, M., Qu, X., Li, Y., 2019. A novel method for evaluating the potential release of trace metals associated with rainfall leaching/runoff from urban soils. *Sci. Total Environ.* 664, 37–44.
- [3] Cao, Q., Yu, D.Y., Georgescu, M., Wu, J.G., Wang, W., 2018. Impacts of future urban expansion on summer climate and heat-related human health in eastern China. *Environ. Int.* 112, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.12.027>.
- [4] Li, F., Liu, Y., Engenl, B.A., Chen, J., Sun, H., 2019. Green infrastructure practices simulation of the impacts of land use on surface runoff: Case study in Ecorse River watershed, Michigan. *Journal of Environmental Management* 233, 603-611. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.078>
- [5] Urcikán P., Rusnák D.: *Stokovanie a čistenie odpadových vôd: Stokovanie I. Navrhovanie stokových sietí*. Bratislava : STU v Bratislave, 2011. ISBN 978-80-227-3435-6.
- [6] www.trnava.sk, [online, prístupné dňa 2019-01-04] dostupné na: <http://www.trnava.sk/sk/clanok/technicka-infrastruktura>

Michaela Červeňanská¹

Študijný program: vodohospodárske inžinierstvo, ročník: 4.

ŠTÚDIA VODOZÁDRŽNÝCH OPATRENÍ NA ÚZEMÍ MESTA TRNAVA

STUDY OF WATER RETENTION MEASURES IN TRNAVA

Abstract

The study is a part of the Strategy for the Adaptation of the City of Trnava to the Impacts of Climate Change – Heat Waves. This material includes an important area, water retention in Trnava. In the past, there were a gate slide on the Trnávka River (flows through the city), which was removed due to the state of emergency. The aim of the study is assessing the rebuilding of the gate slide as well as possibilities of building other water retention measures, which will attract public places and cool down the air in the residential area of the city. The solution consisted in design of three inflatable rubber weirs, its analysis and prognosis of water level and discharge regime in the Trnávka River using mathematical modelling connected with field measurements and updated detailed geodetic survey.

Kľúčové slová

Trnava, Trnávka, vodozádržné opatrenia, vakové hate, matematické modelovanie, HEC-RAS

1. Úvod

Mesto Trnava je vzhľadom na umiestnenie a charakter okolitej krajiny zraniteľné z hľadiska negatívnych dopadov zmeny klímy. Trnavou preteká zregulovaný tok Trnávky. Prietoky v ňom sú ovplyvnené nádržou Boleráz, ktorá je umiestnená vyššie po toku. Do Trnávky však ústia aj potrubia napojené na kanalizáciu, ktorá privádza do toku odľahčované splaškové vody pri každom väčšom privalovom daždi. Tok je potom znečistený, zapácha, čo pri nízkych stavoch vody je predmetom početných sťažností občanov.

Štúdia je súčasťou Stratégie adaptácie mesta Trnava na dopady zmeny klímy – vlny horúčav, ktorú mestské zastupiteľstvo mesta Trnava prijalo ešte v roku 2015 [1]. Súčasťou tohto materiálu je aj dôležitá oblasť, a to zadržiavanie vody na území mesta Trnava. Na toku riečky Trnávka, ktorá preteká naprieč mestom, sa v minulosti nachádzali vodozádržné zariadenia (stavidlá), ktoré boli z dôvodu havarijného stavu odstránené. Samospráva uvažuje o osadení podobných prvkov tak, aby okrem zatraktívnenia verejných priestorov došlo k zadržaniu vody a ochladzovaniu vzduchu.

Cieľom štúdie bolo navrhnúť vodozádržné opatrenia na toku Trnávka v intraviláne mesta Trnava – posúdiť možnosť znovuosadenia stavidiel na toku. Okrem podrobnej analýzy podkladov o riešenom území vrátane okolia toku bol hlavnou časťou štúdie návrh opatrení na zadržanie vody tak, aby neboli negatívne ovplyvnené iné funkcie toku (vplyv vzdutej hladiny na funkčnosť odľahčovacích komôr stokovej siete v meste Trnava, na prechod povodňového prietoku Q_{100} , na úroveň hladiny podzemnej vody v priľahlom území toku Trnávka). Tieto 3 požiadavky boli riešiteľom predostreté na stretnutí so správcom toku, Slovenským vodohospodárskym podnikom, š.p., Správa povodia dolného Váhu v Šali.

¹ Ing. Michaela Červeňanská, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Metodika práce a metódy skúmania

Základná metóda použitá na dosiahnutie vyššie zadefinovaných cieľov štúdie je metóda matematického modelovania. Problematika návrhu vodozádržných opatrení na toku Trnávka bola riešená numerickým modelom v programe HEC-RAS [2], ktorý slúži na analýzu prúdenia vody v riekach (RAS – River Analysis System). Tento program je priebežne vyvíjaný spoločnosťou U.S. ArmyCorps of Engineers (USACE) Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC).

Metodikú práce možno zhrnúť do nasledujúcich krokov [3, 4]:

1. *Stanovenie cieľov modelu*, nakoľko účel modelu rozhoduje o použití vhodných matematických rovníc a tiež vhodného programu na riešenie danej úlohy.
2. *Tvorba koncepčného modelu systému* pozostávajúca zo zhromažďovania a spracúvania všetkých dostupných materiálov za účelom získania potrebných pomerov prostredia. Okrem údajov, ktoré nám poskytol Slovenský vodohospodársky podnik, š. p., Správa povodia dolného Váhu v Šali, boli vykonané merania priamo v teréne, a to geodetické zameranie koryta a blízkeho okolia toku, zistenie hydraulických parametrov toku, chemicko-fyzikálny výskum toku s cieľom zistiť, či je tok chemicky znečistený alebo nie.
3. *Zostavenie numerického modelu* pre konkrétnu modelovanú oblasť. V tomto kroku je koncepčný model upravený do podoby vhodnej na modelovanie.
4. *Kalibrácia modelu* pre už konkrétnu modelovanú oblasť na základe meraní v teréne.
5. *Verifikácia nakalibrovaného modelu* pre konkrétnu modelovanú oblasť na sade kontrolných meraní iných ako boli použité pri kalibrácii modelu.
6. *Prognóza*, ktorá predpovedá odozvu systému na budúce udalosti. Model počíta s nakalibrovanými hodnotami parametrov s výnimkou tých, pri ktorých očakávame, že sa v budúcnosti zmenia. Neistota v predpovedi vyplýva z neistoty pri kalibrácii modelu a neschopnosti odhadnúť presné hodnoty jednotlivých parametrov vstupujúcich do výpočtu.

Aj pri najlepšej snahe o napodobnenie skutočných pomerov a podmienok prúdenia si treba uvedomiť, že model predstavuje len akési zjednodušené znázornenie zložitého systému, v ktorom sú fyzikálne procesy opísané nepriamo prostredníctvom matematických rovníc. Aj pri správnom zostavení modelu môže dôjsť k odchýlkam od reality.

3. Návrh vodozádržných opatrení na toku

Pre potreby zadržania vody v krajine boli na toku Trnávka v prvej etape štúdie navrhnuté dva vzdúvacie objekty vakových hatí, neskôr bola pridaná tretia vzdúvacia stavba. Pri vakových hatiach je hradiacia konštrukcia tvorená gumotextilovým vakom pripevneným na spodnú stavbu a piliere. Vaky sa môžu plniť vodou ale aj vzduchom. Množstvo vody prepádajúcej cez vakový uzáver je regulované výškou vaku. Výška vaku závisí od množstva vody/vzduchu, ktorá/ktorý sa vo vaku nachádza [5].

Ak je potrebné zvýšiť prietok cez hať, vypustí sa z vaku príslušná časť vody, príp. vzduchu, a vak spľasne. Pre zníženie prepúšťaného prietoku sa do vaku napustí viac vody, resp. vzduchu. Dôvodom návrhu práve vakovej hate je niekoľko jej výhod, z ktorých najväčšie sú:

1. konštrukcia vakovej hate je jednoduchšia ako pri tradičných typoch haťových uzáverov,
2. ďalšou výhodou je aj montáž, tiaž a cena.

Pre vhodné umiestnenie profilov vakových hatí boli celkovo vytypované 3 oblasti:

1. prvá vaková hať bude umiestnená v profile, kde v minulosti stálo stavidlo (obr. 1). Maximálna výška plne zahradenej hate je 1,00 m. V profile bývalého stavidla je možné využiť už existujúcu pevnú spodnú stavbu. Daný profil má aj dobrú prístupnosť pre následnú realizáciu stavby;



Obrázok 1: Priečny profil umiestnenia prvej hate pred a po jej realizácii



Obrázok 2: Priečny profil umiestnenia druhej hate pred a po jej realizácii



Obrázok 3: Priečny profil umiestnenia tretej hate pred a po jej realizácii

2. druhý vzdúvací objekt bol navrhnutý v prostredí Parku pri Kalvárii (obr. 2) neďaleko kruhovej budovy hydraulického objektu. Výška vakovej hate bola navrhnutá na 0,6 m. Druhá, nižšie položená hať, by mala vzduť hladinu priamo v meste a to v prostredí parku. V danom profile schádza dole panelová prístupová cesta, ktorá by sa využila pri výstavbe hate, ale zároveň by sa ponechal jej pôvodný účel – prístupová cesta pre udržiavacie práce v koryte toku. Profil hate sa nachádza v dostatočnej vzdialenosti od výpustných objektov, takže pri bežných prietokoch (do $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) nie je ovplyvnená ich funkčnosť vzdutou hladinou.

3. tretí vzdúvací objekt by mohol byť umiestnený blízko Pomníka obetiam 1.svetovej vojny (obr. 3). Jeho výška bola navrhnutá na hodnotu 0,75 m. Výstavbou tohto stupňa by sa zatriktívnil priestor priľahlého parku a zároveň by bola vytvorená kaskáda vzdúvacích stavieb na toku Trnávka.

4. Posúdenie vplyvu navrhnutých opatrení

Výška vakových hatí bola dimenzovaná tak, aby pri minimálnom prietoku, ktorý tečie korytom počas roka, nedochádzalo k zatápaniu výstov kanalizačnej siete. Hodnota takéhoto prietoku bola stanovená na $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, čo predstavuje prietok vypúšťaný z vodnej nádrže Boleráz [6] a pripočítanie prítokov. Po zavzduť toku pri prietoku $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ by hladina v toku mala siahať po dolné okraje výpustných objektov odľahčovacích komôr. Na porovnanie, pri hladine, ktorá nie je vzduť, by k zatopeniu dolnej hrany došlo približne až pri prietoku $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Ďalším nevyhnutným krokom bolo posúdenie vplyvu navrhnutých objektov, tzn. vakových hatí, na prechod povodňového prietoku, ktorého veľkosť pre Q_{100} je $36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Počas simulácie nastalo zatopenie takmer všetkých výpustných objektov a odľahčovacích komôr. Treba však poznamenať, že vybreženie z koryta toku nenastalo. Z hľadiska bezpečnosti bolo navrhnuté, aby sa vakové hate v čase zvýšených prietokov vyhradili a poloha hladiny by sa dostala na pôvodnú výšku, t. j. na výšku bez vzdúvacích objektov.

Realizáciou navrhnutých vodozádržných opatrení by nemalo dôjsť k výraznejšiemu ovplyvneniu hladiny podzemnej vody v príľahlej oblasti toku Trnávka. Vsakovacia rýchlosť nameraná priamo v koryte toku je rádovo $10^{-4} - 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, čo síce odpovedá priepustným zeminám, no ide o vlastnosť zemín nachádzajúcich sa pod vrstvou náplavov, ktorých vsakovacia schopnosť je nižšia. Prvý vzdúvací objekt bol navrhnutý v profile bývalého stavidla, jeho parametre navyše vychádzajú z parametrov tohto stavidla. Obnovením vzdúvacej stavby by sa mal režim podzemnej vody v tejto časti vrátiť do stavu, v ktorom sa nachádzal, keď bývalé stavidlo ešte stálo. Navyše sa jedná o okrajovú časť mesta Trnava, kde by aj prípadný výskyt vyššej hladiny podzemnej vody nemal ohroziť žiadne domy ani iné objekty. V bezprostrednej blízkosti zvyšných dvoch vzdúvacích objektov doposiaľ neboli realizované prieskumné práce. Najbližšie vrty sa nachádzajú v oblasti vzduť od druhej a tretej hate, avšak ich vzdialenosť od koryta je väčšia. Vzhľadom na zeminy, ktoré sa v týchto vrtoch nachádzajú (a je teda aj predpoklad, že sa nachádzajú aj v blízkosti toku), možno konštatovať, že k výraznejšiemu ovplyvneniu hladiny a ani režimu podzemných vôd by vplyvom vzduť nemalo dochádzať. Navyše je možné počítať s kolmatáciou dna a brehov koryta toku, ktorá zabráni infiltrácii vody z toku do podzemnej vody.

5. Záver

Cieľom štúdie je návrh vodozádržných opatrení na toku Trnávka v intraviláne mesta Trnava. Okrem zatriktívnenia verejných priestorov by realizácia takýchto opatrení prispela k zadržaniu vody v intraviláne mesta Trnava a ochladzovaniu okolitého vzduchu. Prvou úlohou bol zber a vyhodnotenie všetkých dostupných podkladov. V rámci tejto etapy boli uskutočnené terénne merania a merná kampaň za účelom zistenia možného chemického znečistenia toku, ktoré sa po vyhodnotení všetkých meraných parametrov (pH, vodivosť, koncentrácia rozpustného kyslíka, koncentrácia NH_4^+ , Cu, SO_4^{2-}) v danom dni nepotvrdilo. Účelom terénnych prieskumov bolo tiež získanie geodetického zamerania koryta (príp. blízkeho okolia koryta toku) a zistenie hydraulických parametrov toku, na ktorom sa realizácia vodozádržných opatrení navrhuje. Zároveň bola za účelom zistenia vsakovacej (infiltračnej) schopnosti pôdy, resp. sedimentov nachádzajúcich sa priamo v koryte toku meraná vsakovacia (infiltračná) rýchlosť. Výsledky vsakovacích pokusov boli použité za účelom zistenia vplyvu navrhovaných opatrení na hladinu podzemnej vody v príľahlom území.

Problematika návrhu vodozádržných opatrení na toku Trnávka bola riešená numerickým modelom v programe HEC-RAS slúžiacom na analýzu prúdenia vody v riekach. Model bol nakalibrovaný využitím údajov získaných z terénnych prieskumov.

Na zostavenom numerickom modeli bol následne simulovaný priebeh hladín, ktorý by sa vytvoril po vybudovaní vodozádržných opatrení. Tieto opatrenia navrhujeme realizovať formou vakových hatí. Optimalizáciou návrhu vakových hatí boli vybraté tri profily, v ktorých sú hate navrhnuté nasledovne:

1. prvá vaková hať umiestnená v profile bývalého stavidla, ktoré bolo v roku 2013 z dôvodu havarijného stavu odstránené, pričom maximálna výška plne zahradenej hate je 1,0 m;
2. druhý vzdúvací objekt bol navrhnutý v prostredí Parku pri Kalvárii, pričom výška vakovej hate bola navrhnutá na 0,6 m. Hať by mala vzduť hladinu priamo v meste, v prostredí parku;
3. profil tretej hate bol navrhnutý v blízkosti Pomníku obetiam 1.svetovej vojny. Jej výška bola navrhnutá na hodnotu 0,75 m. Výstavbou tohto stupňa by sa zatriktívnil priestor priľahlého parku a zároveň by bola vytvorená kaskáda vzdúvacích stavieb na toku Trnávka.

Z hľadiska vplyvu vzdutej hladiny na funkčnosť odľahčovacích komôr stokovej siete by po výstavbe vakových hatí nemalo dôjsť k zatopeniu väčšiny výpustných objektov a odľahčovacích komôr pri minimálnom biologickom prietoku, hladina vody by mala siahať po dolný okraj výpustných objektov odľahčovacích komôr.

Ďalším krokom bolo posúdenie vplyvu navrhnutých objektov na prechod povodňového prietoku, kde počas simulácie nastalo zatopenie takmer všetkých výpustných objektov a odľahčovacích komôr. Preto bolo odporučené, aby sa v čase zvýšených vodných stavov hate vyhradili. V čase povodňového prietoku, ktorý by tiekol korytom s postavenými vakovými haťami, by nemalo dôjsť k vybreženiu vody z koryta toku.

Realizáciou navrhnutých vodozádržných opatrení by nemalo dôjsť ani k výraznejšiemu ovplyvneniu hladiny podzemnej vody v priľahlej oblasti toku Trnávka. Potvrdzujú to jednak vsakovacie pokusy realizované priamo v koryte a tiež fakt, že prvé vzdúvadlo je umiestnené v profile kedysi existujúceho stavidla a druhé a tretie je navrhnuté v oblasti so zeminami, pri ktorých je infiltrované množstvo vody zanedbateľné. Navyše je možné počítať s kolmatáciou dna a brehov koryta toku, ktorá zabráni infiltrácii vody z toku do podzemnej vody.

Po zvážení všetkých vyššie popísaných skutočností bolo mestu Trnava odporučené navrhnuté vodozádržné opatrenia realizovať. Konečná podoba vodných diel však bude určená zodpovedným projektantom.

Literatúra

[1] STEINEROVÁ, J. Princípy formovania vzdelania v informačnej vede. *Pedagogická revue*. 2000, roč. 2, č. 3, s. 8-16. ISSN 1335-1982.

[1] HEGYI, L. - MITERKOVÁ, I. - SCHVALB, M. - ŠTEINER, A.: *Stratégia adaptácie mesta Trnava na dopady zmeny klímy – vlny horúčav*. Trnava, 2015.

[2] BRUNNER, G. W. - CEIWR-HEC: *HEC-RAS. River Analysis System User's Manual*. California: US Army Corps of Engineers, 2010.

[3] KVĚTON, R. - ORFÁNUS, M.: *Hydroinformatika 1.časť. Simulácia procesov prúdenia povrchovej vody v otvorených korytách a cez vodohospodárske objekty*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Nakladateľstvo STU, 2015. 202 s. ISBN 978-80-227-4468-3.

[4] BAROKOVÁ, D.: *Určenie vplyvu vodnej stavby na hladinový režim podzemných vôd a možnosti jeho regulácie*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Vydavateľstvo STU, 2006. 152 s. ISBN 80-227-2367-3.

[5] MOŽIEŠIK Ľ. - DUŠIČKA P. - ŠULEK P.: *Hydrotechnické stavby. Hate. Vnútrozemské vodné cesty a plavebné objekty. Vodné elektrárne a využitie vodnej energie*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2012. ISBN 978-80-227-3656-5.

[6] *Manipulačný poriadok vodnej stavby Boleráz (VN na toku Trnávka v rkm 27,350)*. Piešťany: SVP, š.p. OZ Piešťany, oddelenie TBD, 2006.

Mária Ďurigová¹
Vodohospodárske inžinierstvo, 4. ročník

DETEKCIA BODOV ZLOMU V PRIEMERNÝCH MESAČNÝCH PRIETOKOCH NA SLOVENSKU

DETECTION OF CHANGE-POINTS IN THE MEAN MONTHLY DISCHARGES IN SLOVAKIA

Abstract

The detection of changes involves a detailed analysis of hydrological data in order to prove the character of the changes. This work focuses on an analysis of average monthly discharges for 58 stage-discharge gauging stations, which are located throughout Slovakia. The measured period is from 1962 to 2017. The using approach in the article are statistical methods for identifying change-points in the mean monthly discharges. The aim of the analysis is to identify changes in the statistical properties of the time data series. This can be used as a model of behaviour of the hydrological regime in the conditions of climate change.

Kľúčové slová

Detekcia zmien, body zlomu, priemerné mesačné prietoky.

1. Úvod

Diskusiou o zmenách v prírodných javoch a o tom, či tieto zmeny sú spôsobené antropogénnou činnosťou, sa zaoberajú vedci po celom svete. Zvyšovanie hladiny morí, celkový rast teploty vzduchu, výraznejší výskyt extrémov v hydrológii a meteorológii ovplyvňuje nás a životné prostredie. Štúdie zameriavajúce sa na vplyv zmeny klímy a na zmeny v hydrologickom režime majú vysoký význam, a to najmä v oblasti plánovania a hospodárenia s vodou, protipovodňovej ochrany, v oblasti revitalizácie tokov so zameraním sa na zachovanie kvality akvatického habitatu alebo minimálnych prietokov v období leta. Článok sa venuje detekcii bodov zlomu v priemerných mesačných prietokoch.

2. Prehľad problematiky

Zahraniční aj domáci autori, zaoberajúci sa problematikou detekcie zmien najmä v hydrologických dátach, detegujú zmeny pomocou rôznych metód.

Minimálne ročné prietoky a početnosť ich výskytu v rámci Slovenska skúmal Škoda a kol. [1]. Halmová a Pekárová [2] zhodnocovali minimálne a maximálne denné prietoky v rokoch od 1929 do 2011 pomocou hydrologického softvéru IHA. Jeneiová a kol. [3] sa zamerali na detekciu zmien v dlhých časových radoch. Pre analýzu bolo použitých 9 radov ročných kulminačných prietokov z oblasti južného Slovenska. Zmenami v povodňovom režime našej najväčšej rieky na Slovensku sa zaoberal Pramuk a kol. [4], kde vyhodnocovali zmeny v počte, dobe výskytu a veľkosti povodňových vln na rieke Dunaj. Použili frekvenčnú analýzu a analýzu dlhodobých trendov. Výsledky slovenských

¹ Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Radlinského 11

prác poukazujú na znižovanie koeficientu odtoku, napr. v práci Pramuka a kol. [5], potom zvyšovanie početnosti povodní a zároveň skracovanie času ich trvania (Pramuk kol., [4]).

Výsledky zahraničných prác od Bronsterta a kol. [6], Schönwiesera a Rappa [7] v Nemecku poukazujú na stúpajúci trend prietokov na rieke Rýn, spôsobený zvýšením množstva zimných zrážok. Petrow a Merz [8] sa venovali frekvencii záplav v Nemecku, kde tiež detegovali ich rastúci trend. Bawden a kol. [9] sa zaoberali analýzou trendov a variability hydrologického režimu v povodí kanadskej rieky Athabasca a okolitých povodí. Analýza ukázala, že vo všeobecnosti majú trendy klesajúcu tendenciu. Identifikácii bodu zlomu v hydrologických dátach sa venoval Wong a kol. [10], ktorý použili tzv. sivú relačnú metódu. Metódu aplikovali na niekoľkých vodomerných staniciach na rieke Shunde v Číne. Skúmaním rieky Lena na východnej Sibíri a jej hydrologickej reakcie na zmenu klímy sa zaoberali Gautier a kol. [11]. Skúmali povodňový vývoj rieky Lena, ktorá sa nachádza v najchladnejšej oblasti severnej pologule. Zistili, že jarné povodňové prietoky sa zvýšili, taktiež frekvencia vrcholových prietokov sa zvýšila a začiatok povodne je menej predvídateľný. Letné povodne sú častejšie a intenzívnejšie.

3. Metodika

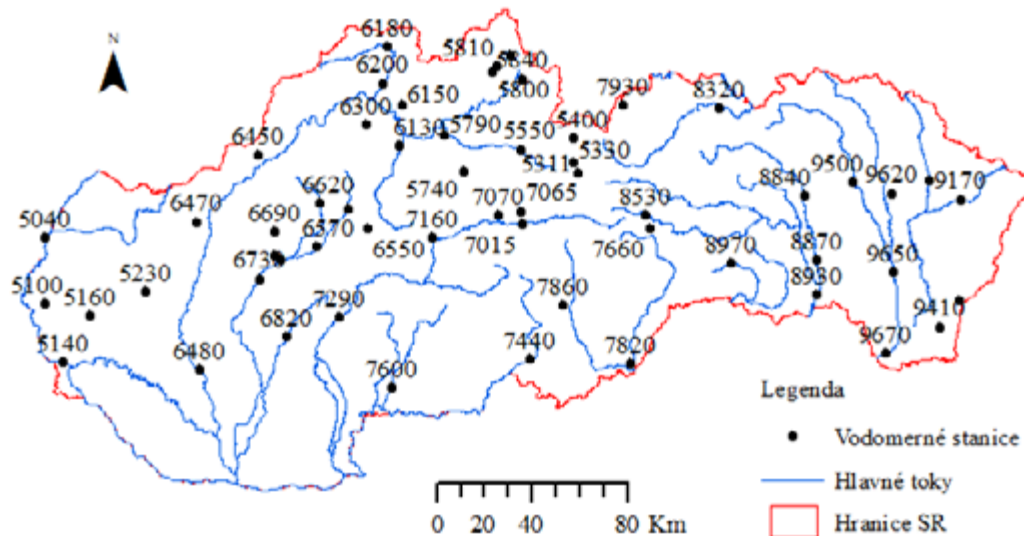
V tomto článku bola použitá metóda pre identifikovanie bodu zlomu pomocou analýzy rezíduí a Pettittov test [12]. Skúmané časové rady údajov boli priemerné mesačné, sezónne a ročné prietoky za hydrologický rok. Zimné obdobie bolo zadefinované od novembra po apríl a letné obdobie od mája po október.

Metóda detekcie bodu zlomu pomocou analýzy rezíduí spočíva vo vypočítaní rozdielu medzi priemernými mesačnými prietokmi a ich dlhodobými priemerami. Získané rezíduá sa potom kumulatívne sčítavali. Absolútna maximálna hodnota kumulatívneho sčítania predstavovala bod zlomu prislúchajúcemu roku v danom časovom rade.

Na zistenie jedného bodu zlomu, resp. bodu zmeny v hydrologických súboroch dát, sa často používa Pettittov test. Testuje sa nulová hypotéza, ktorá predpokladá, že premenné sa riadia jednou alebo viacerými rozdeleniami, ktoré majú rovnaký parameter lokalizácie, oproti alternatívnej hypotéze, že v súbore dát existuje bod zlomu, resp. bod zmeny (Pohlert, [13]).

4. Vstupné údaje

Pre potreby tejto práce bolo vybraných 58 slovenských vodomerných staníc (Obr. 1, Tab. 1). Vodomerné stanice sú bez významného ovplyvnenia odbermi, manipuláciou na vodných nádržiach a prevodmi vody. Tieto vodomerné stanice boli vybrané aj na základe práce Danáčová a kol., [14], kde pracovali s týmito vodomernými stanicami v rámci skúmania hydrologických extrémov. V súbore vodomerných staníc sú napríklad stanice Bratislava – Dunaj – 5140 a Šaľa – Váh – 6480, ktoré sú ovplyvnené, ale do výpočtov boli zaradené kvôli dlhému radu pozorovaní a kvôli získaniu dostatočného pokrytia západnej časti Slovenska. Pozorované rady údajov nám poskytol Slovenský hydrometeorologický ústav.



Obrázok 1: Lokalizácia použitých vodomerných staníc na území SR s prislúchajúcim číslom stanice.

Tabuľka 1: Zoznam použitých vodomerných staníc.

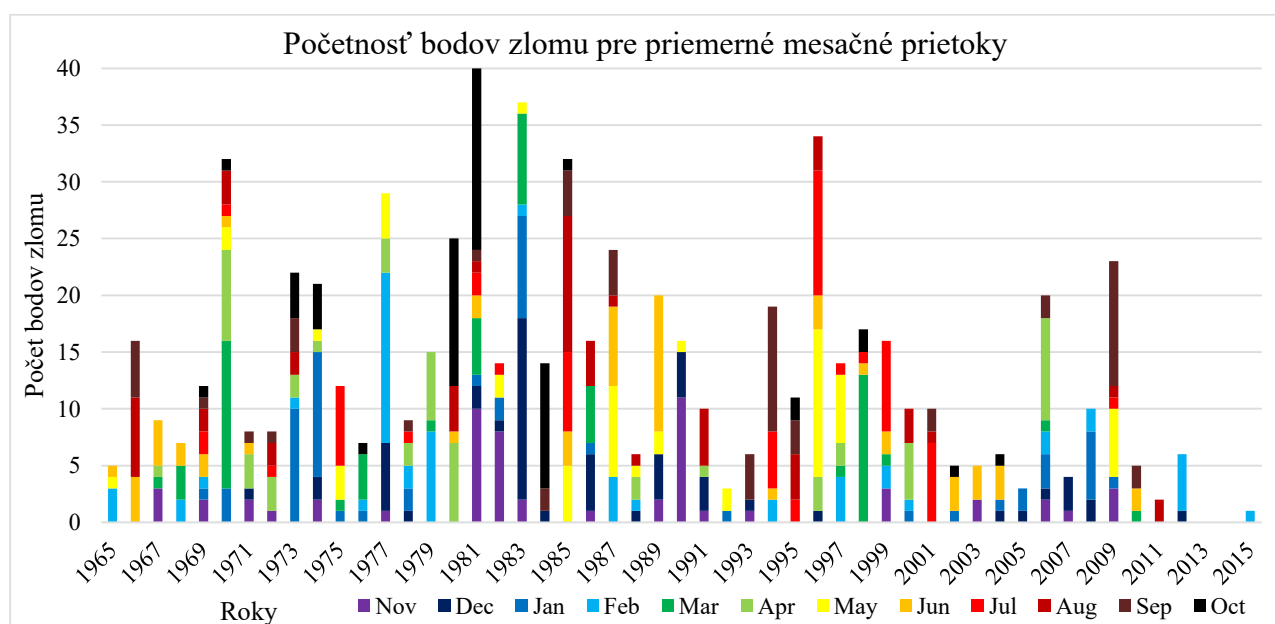
| Č. ST. | STANICA | TOK | PLOCHA POVODIA [km ²] | NADM. V. "0" VDČ [m.n.m.] | Č. ST. | STANICA | TOK | PLOCHA POVODIA [km ²] | NADM. V. "0" VDČ [m.n.m.] |
|--------|-------------------|--------------|-----------------------------------|---------------------------|--------|--------------------|---------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 5040 | Moravský Ján | Morava | 24129,30 | 146,24 | 6690 | Biskupice | Bebrava | 312,60 | 190,34 |
| 5100 | Láb | Močiarka | 47,10 | 144,33 | 6710 | Nadlice | Bebrava | 598,81 | 171,09 |
| 5140 | Bratislava | Dunaj | 131331,1 | 128,43 | 6730 | Nitrianska Streda | Nitra | 2093,71 | 158,27 |
| 5160 | Pezinok | Blatina | 19,09 | 238,59 | 6820 | Vieska n/Žitavou | Žitava | 295,46 | 154,27 |
| 5230 | Bohdanovce | Trnávka | 115,02 | 157,17 | 7015 | Brezno | Hron | 582,08 | 490,91 |
| 5310 | Čierny Váh | Ipol'tica | 87,07 | 736,36 | 7065 | Mýto p/Ďumbierom | Štiavnička | 47,10 | 616,75 |
| 5311 | Čierny Váh | Čierny Váh | 243,06 | 733,31 | 7070 | Dolná Lehota | Vajskovský p. | 53,02 | 495,28 |
| 5330 | Východná | Biely Váh | 105,64 | 731,64 | 7160 | Banská Bystrica | Hron | 1766,48 | 334,32 |
| 5400 | Podbanské | Belá | 93,49 | 922,72 | 7290 | Brehy | Hron | 3821,38 | 194,27 |
| 5550 | Liptovský Mikuláš | Váh | 1107,21 | 567,68 | 7440 | Holiša | Ipeľ | 685,67 | 172,40 |
| 5740 | Podsuhá | Revúca | 217,95 | 558,21 | 7600 | Plášťovce | Litava | 214,27 | 142,02 |
| 5790 | Lubochňa | Lubochnianka | 118,39 | 442,00 | 7660 | Dobšiná | Dobšinský p. | 31,97 | 453,46 |
| 5800 | Lokca | Biela Orava | 359,96 | 619,06 | 7820 | Lenartovce | Slaná | 1829,65 | 150,43 |
| 5810 | Oravská Jasenica | Veselianka | 90,10 | 618,09 | 7860 | Lehota n/Rimavicou | Rimavica | 148,95 | 263,65 |
| 5820 | Zubrohľava | Polhoranka | 158,67 | 605,69 | 7930 | Ždiar. Podspády | Javorinka | 34,89 | 907,80 |
| 5840 | Trstená | Oravica | 129,95 | 585,49 | 8320 | Chmelnica | Poprad | 1262,41 | 507,41 |
| 6130 | Martin | Turiec | 827,00 | 389,90 | 8530 | Stratená | Hnilec | 68,23 | 789,24 |
| 6150 | Stráža | Varínka | 139,70 | 399,87 | 8840 | Prešov | Sekčov | 352,80 | 234,11 |
| 6180 | Čadca | Kysuca | 492,54 | 408,36 | 8870 | Košické Olšany | Torysa | 1298,30 | 185,70 |
| 6200 | Kysucké N. Mesto | Kysuca | 955,09 | 346,09 | 8930 | Ždaňa | Hornád | 4232,20 | 169,41 |
| 6300 | Poluvsie | Rajčianka | 243,60 | 393,06 | 8970 | Nižný Medzev | Bodva | 90,15 | 310,24 |
| 6450 | Horné Smie | Vlára | 341,79 | 239,12 | 9120 | Koškovce | Laborec | 437,90 | 185,36 |
| 6470 | Čachtice | Jablonka | 163,25 | 179,18 | 9170 | Snina | Cirocha | 250,04 | 209,27 |
| 6480 | Šaľa | Váh | 11217,61 | 109,21 | 9320 | Lekárovce | Uh | 1989,41 | 98,92 |

| | | | | | | | | | |
|------|-----------|-----------|---------|--------|------|--------------------|----------|----------|--------|
| 6540 | Nedožery | Nitra | 181,57 | 287,00 | 9410 | Veľké Kapušany | Latorica | 2915,46 | 93,70 |
| 6550 | Handlová | Handlovka | 40,18 | 381,26 | 9500 | Hanušovce n/Topľou | Topľa | 1050,05 | 160,40 |
| 6570 | Chalmová | Nitra | 601,11 | 210,71 | 9620 | Jasenovce | Ofka | 173,94 | 139,75 |
| 6620 | Liešťany | Nitrica | 136,08 | 334,33 | 9650 | Horovce | Ondava | 2885,8 | 101,27 |
| 6640 | Chynorany | Nitra | 1134,28 | 173,14 | 9670 | Streda n/Bodrogom | Bodrog | 11474,25 | 91,48 |

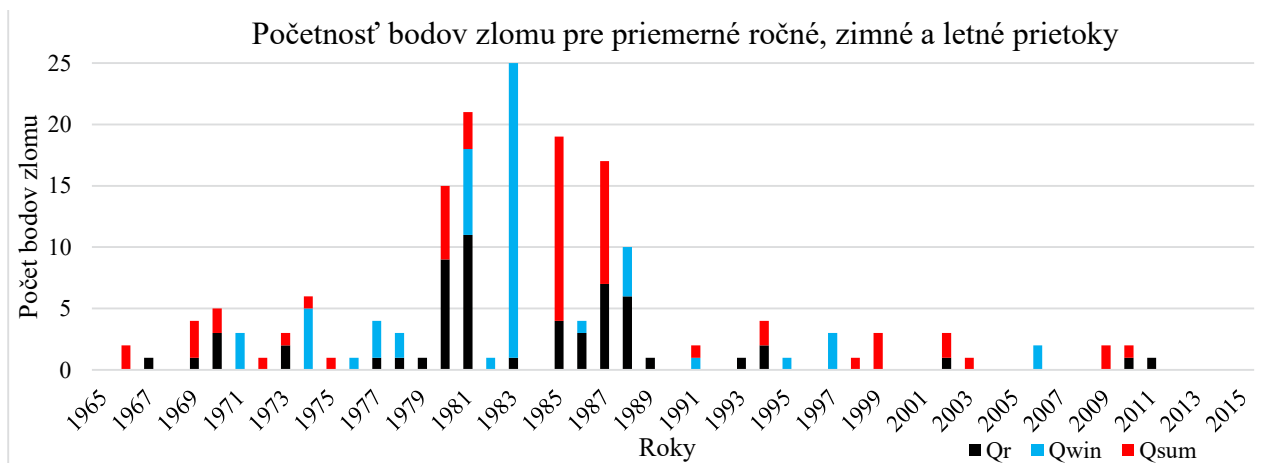
Jednotlivé vodomerné stanice majú plochy povodí rôzne veľké a vodomerné stanice sa nachádzajú v rôznej nadmorskej výške (od 91,48 m n. m. – Streda nad Bodrogom do 922,72 m n. m. - Podbanské). Cieľom tohto výberu bolo najrovnomernejšie pokrytie celého Slovenska a výber čo najväčšieho počtu staníc, ktoré sú neovplyvnené alebo málo ovplyvnené.

5. Výsledky

Výsledky analýzy rezíduí sú vykreslené osobitne do dvoch grafov, kvôli oddeleniu mesačných prietokov od ročných a sezónnych. Obr. 2 znázorňuje početnosť bodov zlomu v jednotlivých mesiacoch od novembra po október. V Obr. 3 sú znázornené priemerné ročné a sezónne prietoky, teda Q_r , Q_{win} , Q_{sum} .



Obrázok 2: Početnosť bodov zlomu vypočítaných pomocou analýzy rezíduí pre priemerné mesačné prietoky



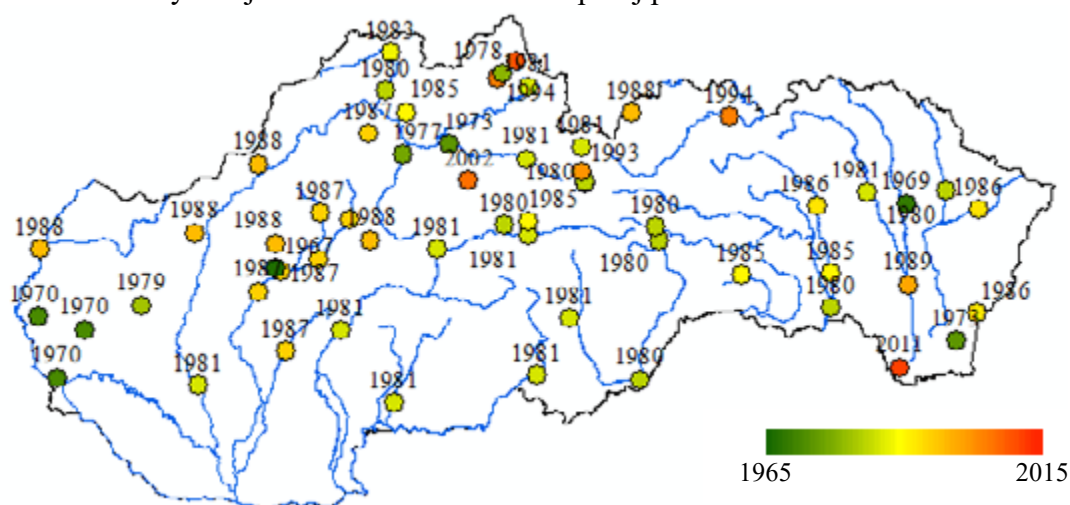
Obrázok 3: Početnosť bodov zlomu vypočítané pomocou analýzy rezíduí pre priemerné ročné prietoky (Q_r – čierna farba) a sezónne prietoky (Q_{win} – modrá farba, Q_{sum} – červená farba)

Celkovo najviac bodov zlomu bolo identifikovaných v roku 1983 (spolu 62 bodov zlomu celkového počtu bodov zlomu 870, čo predstavuje 7,13 %). Najviac sa ich nachádzalo v priemerných zimných prietokoch - 23 bodov zlomu znázornené v Obr. 3 modrou farbou.

Druhým najpočetnejším rokom bol rok 1981 (spolu 61 bodov zlomu, čo predstavuje 7,01 %), ktorému najviac napomohli priemerné mesačné prietoky (najmä Q_{oct} a Q_{nov}) znázornené v Obr. 2 čiernou a fialovou farbou. Rok 1985 s 51 bodov zlomu (5,86 %) predstavuje tretí najpočetnejší rok. Zároveň 80-te roky predstavujú obdobie, v ktorom sa najčastejšie objavujú body zlomu (341 bodov zlomu z 870, teda 39,2 % z celkového počtu bodov zlomu).

Ďalej bol použitý Pettittov test na detekciu bodu zlomu s hladinou významnosti v našom prípade $\alpha=0,1$. Celkový počet štatisticky významných bodov zlomu bol 123. Najviac ich bolo zistených v roku 1981 (15 bodov zlomu), potom v rokoch 1988 (14 bodov zlomu), 1985 a 1989 (9 bodov zlomu). Väčšina bodov zlomu zistených pomocou prvej metódy sa zhoduje s Pettittovým testom v danom roku. Taktiež vo viacerých prípadoch Pettittov test odhadol bod zlomu o rok skôr alebo neskôr ako analýza rezíduí.

Výsledky prvej metódy boli priestorovo vizualizované pomocou program ArcGIS. Ako príklad priestorovej analýzy boli vybrané priemerné ročné prietoky Q_r (Obr. 4). Na strednom Považí a v povodí Nitry možno pozorovať viaceré body zlomu v druhej polovici 80. rokov. Územie stredného Slovenska vykazuje viacero bodov zlomu v prvej polovici 80. rokov.



Obrázok 4: Body zlomu vypočítané pomocou rezíduí pre priemerné ročné prietoky Q_r

V rámci ostatných mesiacov sa najčastejšie združujú podobné roky bodu zlomu na hornom úseku Váhu, v povodí Nitry a juh stredného Slovenska (južné časti povodí Nitry, Hrona, Ipľa a Slanej). Toto rozloženie bodov zlomu môže byť spôsobené viacerými faktormi, ako napr. spoločné hydrologické a morfológické podmienky v jednotlivých povodiach.

6. Záver

Výsledky detekcie bodov zlomu v rámci 58-ich vodomerných staníc na Slovensku poukazujú na významné množstvo bodov zlomu v 80. rokoch. Skoro 40 % bodov zlomu bolo detegovaných prvou metódou analýzy rezíduí. Pomocou Pettittovho testu bolo detegovaných skoro 65 % štatisticky významných bodov zlomu v 80. rokoch. Vo významnom zastúpení tam figurovali roky 1981 a 1988..

PodĎakovanie: Uvedená práca vznikla vďaka finančnej pomoci grantovej agentúry VEGA 1/0891/17 a vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra:

- [1] ŠKODA, P. – MAJERČÁKOVÁ, O. – DEMETEROVÁ, B – DANÁČOVÁ, Z. 2008: Zhodnotenie vývoja minimálnych prietokov na území Slovenska, Národný Klimatický program Slovenskej Republiky, NKP 12/08, Dôsledky klimatickej zmeny a adaptačné opatrenia, s. 49 – 60.
- [2] HALMOVÁ, D. - PEKÁROVÁ, P. 2013: Trendová analýza mesačných a extrémnych prietokov v stanici Belá-Podbanské. In ACTA HYDROLOGICA SLOVACA, ročník 14, č. 1, str. 193 – 203.
- [3] JENEIOVÁ, K. – KOHNOVÁ, S. – PARAJKA, J. – SZOLGAY, J. 2015: Detekcia zmien v časovom rade kulminačných prietokov v oblasti južného Slovenska. In ACTA HYDROLOGICA SLOVACA, ročník 16, Tematické číslo, 2015, str. 53 – 58.
- [4] PRAMUK, B. – PEKÁROVÁ, P. – HALMOVÁ, D. 2013: Identifikácia zmien povodňových prietokov Dunaja v stanici Bratislava v období 1876 – 1943 a 1944 – 2010. In ACTA HYDROLOGIGA SLOVACA, ročník 14, č. 2, 2013, 327 – 336.
- [5] PRAMUK, B.; PEKÁROVÁ, P.; ŠKODA, P.; HALMOVÁ, D.; BAČOVÁ MITKOVÁ, V. 2016: Identifikácia zmien režimu denných prietokov slovenských riek. In ACTA HYDROLOGICA SLOVACA, ročník 17, č. 1, 2016, str. 65 – 77
- [6] BRONSTERT, A., NIEHOFF, D., BÜRGER, L. 2002: Effects of climate and land – use change on storm runoff generation: Present knowledge and modelling capabilities. In: Hydrological Processes, 16 (2), p. 509 – 529, DOI: 10.1002/hyp.326.
- [7] SCHÖNWESE CD. - RAPP J. 1997: Climate Trend Atlas of Europe—Based on Observations 1891–1990. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht: 224.
- [8] PETROW, T. – MERZ, B. 2009: Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951–2002. In Journal of Hydrology 371 (2009) 129–141.
- [9] BAWDEN, A. – LINTON, H. – BURN, D. – PROWSE, T. 2014: A spatiotemporal analysis of hydrological trends and variability in the Athabasca River region, Canada. In Journal of Hydrology 509 333–342.
- [10] WONG, H. – HU, B. Q. – IP, W. C. – XIA, J. 2006: Change point analysis of hydrological time series using grey relational method. In Journal of Hydrology 324, 323 – 338.
- [11] GAUTIER, E. – DÉPRET, T. – COSTARD, F. – VIRMOUX, C. – FEDEROV, A. – GRANCHER, D. KONSTANTINOV, P. – BRUNSTEIN, D. 2018: Going with the flow: Hydrologic response of middle Lena River (Siberia) to the climate variability and change. In Journal of Hydrology 557, 475 – 488.
- [12] PETTITT, A. N. 1979: A non-parametric approach to the change-point problem. J Appl Stat 28(2): str. 126 – 135.
- [13] POHLERT, T. 2018: Non-parametric trend tests and change-point detection. CC BY-ND 4.0.
- [14] DANÁČOVÁ, Z. – BLAŠKOVIČOVÁ, L. – LOVÁSOVÁ, E. – POÓROVÁ, J. – ŠIMOR, V. – ŠKODA, P. 2015: Hydrologické extrémny: modelovanie a predpovedanie. In ACTA HYDROLOGICA SLOVACA. Ročník 16, Tematické číslo 1, 2015, 13–22.

Gabriel Földes¹

Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, 3. ročník

VYUŽITIE KLIMATICKÉHO SCENÁRA CLM PRI URČENÍ BUDÚCICH NÁVRHOVÝCH HODNOTÁCH INTENZÍT KRÁTKODOBÝCH DAŽĎOV V KLIMATOLOGICKEJ STANICI LIPTOVSKÁ TEPLIČKA

USE OF CLM CLIMATE SCENARIO FOR ASSESING OF THE FUTURE DESIGN VALUES OF SHORT-TERM RAINFALL INTENSITIES AT THE LIPTOVSKÁ TEPLIČKA CLIMATOLOGICAL STATION

Abstract

The study focuses on the use of outputs of the future short-term rainfall intensities, modeled by regional climate model CLM at the Liptovská Teplička climatological station in the northern region of Slovakia for assessment of the design rainfall intensities. We analysed changes of seasonality, trends and scaling coefficients. Changes were detected on the short-term rainfall intensities for the months during the warm period. The CLM regional climate scenarios were used for the period 1960-2000 and 2070-2100. To compare the changes the actual measured rainfall depths for the period 1995-2009 were also evaluated. The analysis was performed on the rainfall durations 60, 120, 180, 240 and 1440 minutes.

Kľúčové slová

krátkodobé zrážky, trendy, sezónnosť, škálovanie, klimatický scenár, CLM

1. Úvod

Dažde sa menia z roka na rok, dekád, storočí a tieto zmeny sa preukazujú v kvantite, trvaní, intenzitách, periodicite a frekvencii dažďov. Rozdiel v stálom a slabom daždi, ktorý vsiakne do pôdy je užitočný pre rastliny a prostredie avšak dážď s rovnakou intenzitou a za kratší čas môže spôsobiť lokálne povodne a priamy povrchový odtok a zanechá značné škody na životnom prostredí [1]. Tieto extrémny sa vyskytujú čoraz častejšie celosvetovo a majú vážny dopad na spoločnosť a ohrozujú životy a majetky ľudí [2]. Preto je potrebné venovať pozornosť a kvantifikovať ich veľkosť a frekvenciu aj v súčasnosti, ale aj pre budúce obdobia. V poslednom období sa to odzrkadľuje aj na množstve štúdií, ktoré sa venujú danej problematike na celom svete ako napr.: detekcia budúcich zmien v sezónnosti extrémnych krátkodobých dažďov vo vybraných staniach na Slovensku [3], analýza trendov v zrážkových údajoch v Turecku [4], predpokladané zmeny charakteristík zrážkových udalostí v Českej republike [5], Škálovanie intenzít krátkodobých dažďov na Slovensku [6].

Cieľom práce je analýza výstupov scenára CLM pre stanovenie návrhových hodnôt intenzít krátkodobých dažďov v klimatologickej stanici Liptovská Teplička. Časť práce je venovaná analýze zmien v sezónnosti s použitím metódy Burnovho vektoru, analýze trendov použitím Mann-Kendallovej metódy a odvodením a analýze návrhových hodnôt intenzít krátkodobých dažďov pomocou metódy jednoduchého škálovania.

¹ Gabriel, Földes, Ing.,

Katedra vodného hospodárstva krajiny, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. CLM scenár

CLM model vznikol ako projekt spolupráce medzi vedcami v sekcii pozemných vied a divíziou klimatických a globálnych dynamík v Národnom centre pre výskum atmosféry (NCAR – Nation Center for Atmospheric Research) a pracovnej skupine pôdneho modelu CESM (Community Earth System Model) v USA [7].

Model používa koncepcie ekologickej klimatológie, ktorá je využívaná ako interdisciplinárny rámec na pochopenie prirodzených ale aj ľudských zmien vo vegetácii a ich vplyv na klímu. Skúma fyzikálne, chemické a biologické procesy, ktorými terestriálne ekosystémy ovplyvňujú a sú ovplyvňované klímou v rôznych priestorových a časových mierkach. Ústrednou témou je, že terestrické ekosystémy prostredníctvom svojej energie, vody, chemických prvkov a stopových plynov sú dôležitými determinantmi klímy. Časti modelu pozostávajú z heterogenity povrchu, bio-geofyziky, hydrologického cyklu, bio-geochemie, ekosystémovej dynamiky a časť ľudského rozmeru. Počas dlhších časových období ako sú storočia a tisícročia sa zmeny vegetácie dejú aj v reakcii na klimatické zmeny. CLM sa zaoberá niekoľkými aspektmi, ktoré umožňujú štúdium obojsmerných interakcií medzi ľudskými činnosťami v krajine a podnebním vrátane zmien zemského pokryvu/zmien využívania pôdy, poľnohospodárskych postupov a urbanizácie [8].

3. Metodické postupy

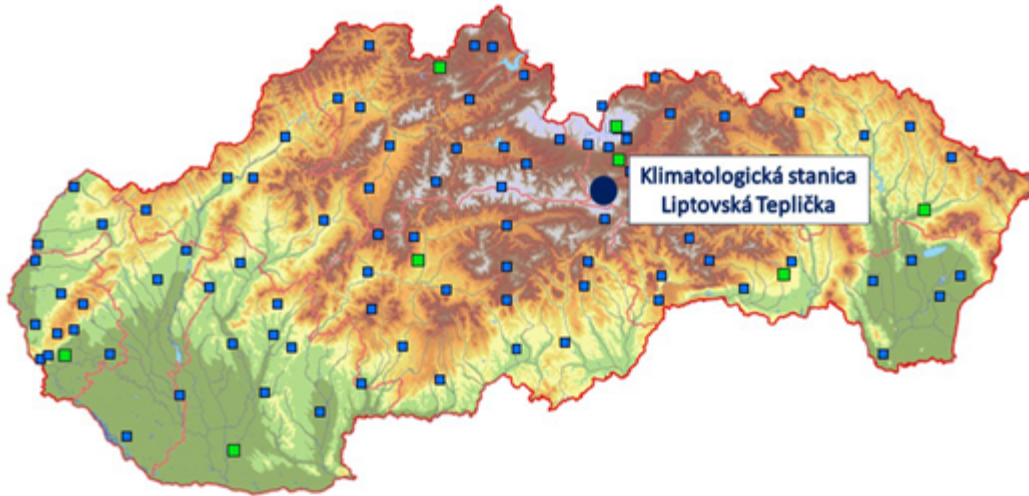
V analýze využitia scenára pre návrhové hodnoty intenzít krátkodobých dažďov pomocou jednoduchého škálovania boli vykonané aj analýzy v charakteristikách zrážok a to zmeny v sezónnosti, trendoch následne boli určené návrhové hodnoty a porovnané s hodnotami z reálnych meraní.

Pre odhad sezónnosti výskytu sezónnych javov bola použitá metóda Burnovho vektoru. Metóda opisuje variabilitu dátumu pri ktorom sa vyskytuje maximálny úhrn zrážok [9]. Pre posúdenie trendov v dátach bol použitý Mann – Kendallov test trendu. Úlohou testu je štatistické posúdenie štatistickej významnosti stúpajúceho alebo klesajúceho trendu vybranej veličiny v čase [10, 11].

Na spracovanie údajov o zrážkových úhrnoch za kratšie časové obdobie ako jeden deň sa používa jednoduché škálovanie. Metódu jednoduchého škálovania je možné aplikovať na vzťah medzi intenzitou, trvaním a periodicitou zrážok tzv. IDF vlastnosti. Jednoduché škálovanie spočíva v určení návrhových hodnôt pre trvanie kratšie ako jeden deň a pre zvolenú dobu opakovania využitím denných záznamov úhrnov zrážok, ktoré sú bežne k dispozícii [12, 13]. Detailnejšiemu opisu použitých metód bola venovaná publikácia metódy analýz budúcich zmien v charakteristikách intenzít krátkodobých zrážok [14].

4. Vstupné údaje

Vstupné údaje tvorili reálne merania a súbor dát z CLM modelu pre klimatologickú stanicu Liptovská Teplička. Hodnotené obdobia boli zvolené: historické od 1960-2000, reálne pozorovania 1995-2009 a budúce obdobie 2700-2100. Návrhové hodnoty boli spracované pre budúce obdobie a v trvaniach 60, 120, 180, 240 a 1440 minút. Údaje z reálnych pozorovaní boli poskytnuté Slovenským hydrometeorologickým ústavom, dáta zo scenára boli poskytnuté doc. RNDr. Martinom Gerom PhD. z Univerzity Komenského v Bratislave. Zvolená klimatologická stanica sa nachádza na severe Slovenska (obr.2) na úpätí Nízkych Tatier v nadmorskej výške 920 m n. m. patrí do mierne chladnej oblasti s júlovou priemernou teplotou 12-16°C s ročným úhrnom dažďov okolo 1100 mm.

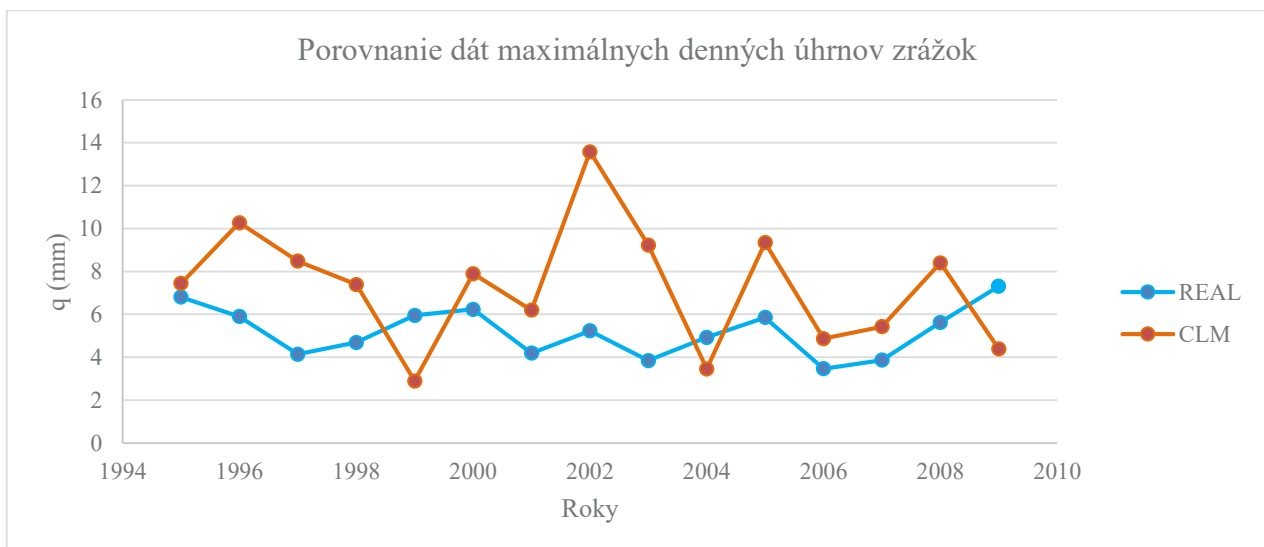


Obrázok 1 – Poloha zvolenej klimatologickej stanice Liptovská Teplička v klimatologickej staničnej sieti Slovenska

Figure 1 – Location of the Liptovská teplička climatological stations in the Slovakian Climatological Network

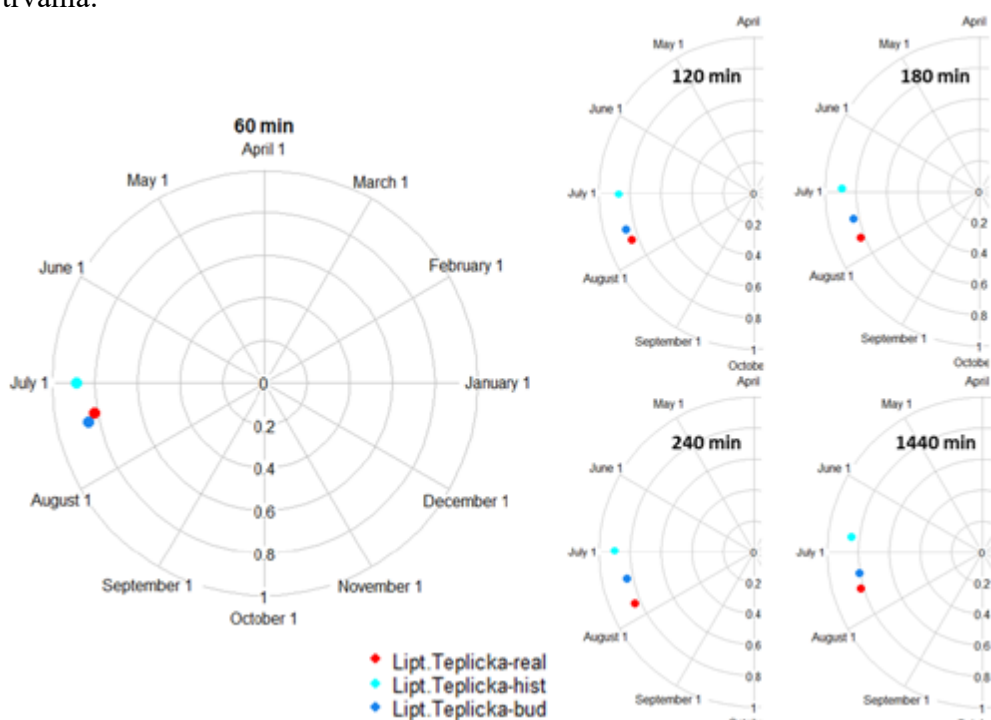
5. Výsledky a diskusia

V prvej časti boli analyzované zmeny v sezónnosti a v trendoch krátkodobých úhrnov dažďov. Následne boli zoškálované škálovacie koeficienty a pomocou nich odvodené návrhové hodnoty úhrnov dažďov. Pri spracovaní údajov boli porovnávané údaje zo scenára s reálnymi pozorovaniami. Na obrázku 2 sú znázornené maximálne denné úhrny dažďov (teplý polrok), pričom scenár vykazuje vyššie hodnoty v niektorých prípadoch až extrémne nadhodnotené úhrny oproti reálnym pozorovaniam, konkrétne v rokoch 1996, 2002, 2003 a 2005.



Obrázok 2 – Porovnanie dát zo scenára a z reálnych pozorovaní
Figure 2 – Comparison of actual observation and scenario data

Pri analýze sezónnosti maximálnych úhrnov zrážok bola použitá metóda Burnovho vektora, výsledky sú prezentované pomocou radiálnych grafov v jednotkových kružniciach (obr.3). Reálne pozorovania sú uvedené červenou farbou ich výskyt je vo väčšine analyzovaných trvaniach v druhej polovici mesiaca Júli. V trvaní 60 minút je výskyt v prvej polovici mesiaca. V scenárovej minulosti sa sezónnosť maximálnych úhrnov dažďov vyskytuje na prelome mesiacov jún a júl a v grafoch sú značené bledomodrou farbou. Pre budúce obdobie je výskyt maximálnych úhrnov krátkodobých úhrnov podobný výskytu z reálnych pozorovaní, kde odchýlka je v rozmedzí od 2-14 dní. V grafoch sú znázornené výskyty pre budúce obdobie tmavo modrou farbou. Zmeny v sezónnosti krátkodobých úhrnov dažďov pre budúce obdobia oproti reálnym pozorovaniam sú v rozmedzí 2 týždňov pre všetky intenzívne trvania.



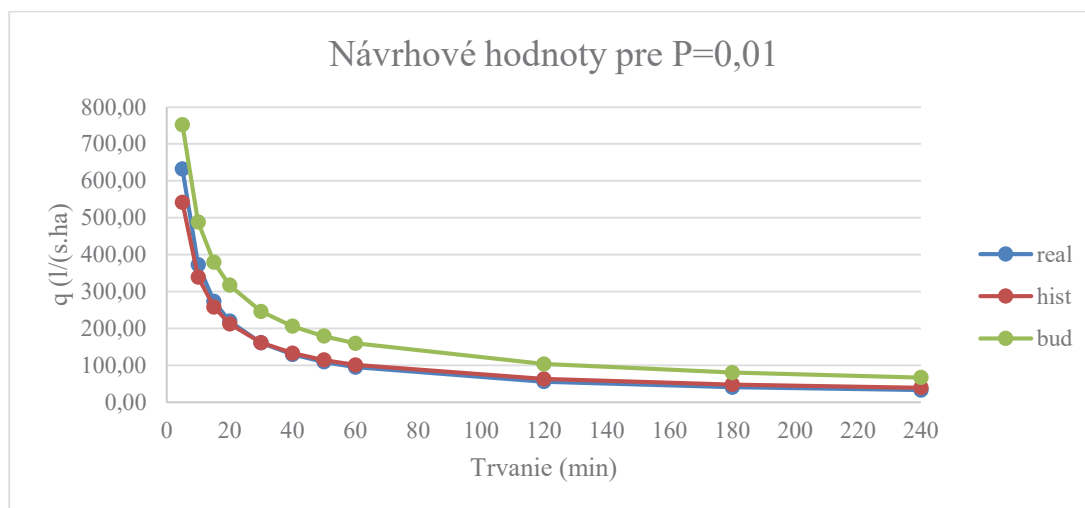
Obrázok 3 – Výskyt maximálnych úhrnov dažďov v klimatologickej stanici Lipt. Teplička
Figure 3 – Occurrence of maximal rainfall depths at Lipt. Teplička climatological station

Ďalším krokom bolo určenie trendov v dátach scenár preukazuje stúpajúci trend, klesajúce trendy sa objavili len v reálnych pozorovaní a to v trvaniach 60 a 1440 minút. V žiadnom pozorovanom období sa neobjavili štatisticky významné trendy na hladine významnosti 90%. Výsledky sú sumarizované v tabuľke 1.

Tabuľka 1 – Trendy v krátkodobých úhrnov dažďov
Table 1 – Trends in short-term rainfall depths

| Trvanie | real | hist | bud |
|---------|------|------|-----|
| 60 | - | + | + |
| 120 | + | + | + |
| 180 | + | + | + |
| 240 | + | + | + |
| 1440 | - | + | + |

Posledným krokom bolo určenie a porovnanie návrhových hodnôt úhrnov dažďov v klimatologickej stanici Liptovská Teplička pomocou metódy jednoduchého škálovania. Škálovaním štatistických momentov boli odvodené škálovacie koeficienty a pomocou nich následne zoškálované návrhové hodnoty pre jednotlivé trvania. Výsledky pre dobu opakovania 100 rokov sú uvedené v obrázku 4. Scenár predpokladá zvýšenie intenzít v danej lokalite oproti hodnotám z reálnych pozorovaní v niektorých trvaniach v priemere okolo 70%.



Obrázok 4 – Návrhové hodnoty intenzít úhrnov dažďov v klimatologickej stanici Liptovská Teplička pre dobu opakovania 100 rokov

Figure 4 – Design values of rainfall intensities for the Liptovská Teplička climatological station for the return period 100 years

6. Záver

Práca je zameraná na analýzu scenára CLM pre využitie pri návrhových intenzitách krátkodobých dažďoch v klimatologickej stanici Liptovská Teplička. Na porovnanie boli použité dáta z reálnych pozorovaní. Porovnávané boli obdobia scenárové historické (1960-2000) a budúce (2070-2100) s reálnymi pozorovaniami (1995-2009), pre trvania 60, 120, 180, 240 a 1440 minút. Analyzované boli zmeny v sezónnosti a v trendoch, následne boli odvodené a porovnané návrhové hodnoty krátkodobých intenzít dažďov. Výsledky môžu byť sumarizované v nasledovných bodoch:

- Maximálne úhrny dažďov nastávajú v druhej polovici mesiaca jún.
- Zmeny v sezónnosti krátkodobých úhrnov dažďov pre budúce obdobia oproti reálnym pozorovaniam sú v rozmedzí 2 týždňov pre všetky intenzitné trvania a to na skoršie obdobie oproti reálnym pozorovaniam.
- V trendoch krátkodobých úhrnov dažďov sa významné trendy na hladine významnosti 90% neobjavili ani v jednom intenzitnom trvaní.
- Prevládajúci trend krátkodobých úhrnov dažďov má stúpajúci charakter.
- Návrhové hodnoty krátkodobých úhrnov dažďov pre budúce obdobie dosahujú až 160% zvýšenie oproti reálnym pozorovaniam.

Z výsledkov je možné usúdiť zmeny v sezónnosti, ktoré oproti reálnym pozorovaniam budú nastávať v skoršom období. Trendy krátkodobých úhrnov dažďov taktiež preukazujú rastúci avšak nevýznamný charakter na hladine významnosti 90 %. Hodnoty návrhových intenzít úhrnov krátkodobých dažďov do budúceho obdobia preukazujú taktiež zvýšené v priemere 70%. Pomocou

scenáru CLM boli analyzované stanice aj na západnom a južnom Slovensku, kde scenár vykazuje podobné výsledky ako pri stanici Liptovská Teplička.

PodĎakovanie

Článok vznikol vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja a za podpory VEGA 1/0632/19. Autor ďakuje za podporu pri tvorbe tohto príspevku.

Literatúra

- [1] TRENBERTH, KE. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*. 31 March 2011. Vol. 47, no. 1, p. 123–138. doi 10.3354/cr00953. <http://www.int-res.com/abstracts/cr/v47/n1-2/p123-138/>
- [2] CHAN, S. C., KENDON, E. J., FOWLER, H. J., BLENKINSOP, S., ROBERTS, N. M. and FERRO, C. A. T. The value of high-resolution Met Office regional climate models in the simulation of multi-hourly precipitation extremes The Value of High-Resolution Met Office Regional Climate Models in the Simulation of Multihourly Precipitation Extremes. *Journal of Climate*. 2014. Vol. 27, no. 16, p. 6155–6174. doi 10.1175/JCLI-D-13-00723.1.
- [3] VASILAKI, M., KOHNOVÁ, S., HANEL, M., SZOLGAY, J., HLAVČOVÁ, K., LOUKAS, A. and RONČÁK, P. Detection of future changes in seasonality in extreme short-term rainfall in selected stations of Slovakia. *Contributions to Geophysics and Geodesy*. 2017. Vol. 47, no. 2, p. 133–148.
- [4] PARTAL, Turgay and KAHYA, Ercan. Trend analysis in Turkish precipitation data. *Hydrological Processes*. 2006. Vol. 20, p. 2011–2026. doi 10.1002/hyp.5993.
- [5] SVOBODA, V., HANEL, M., MÁČA, P. and KYSELÝ, J. Projected changes of rainfall event characteristics for the Czech Republic. *J. Hydrol. Hydromech.* 2016. Vol. 64, no. 4, p. 415–425.
- [6] BARA, Márta, GAÁL, Ladislav, KOHNOVA, Silvia, SZOLGAY, J. and HLAVČOVÁ, Kamila. On the use of the simple scaling of heavy rainfall in a regional estimation of IDF curves in Slovakia. *J. Hydrol. Hydromech.* 2010. Vol. 58, no. 1, p. 49–63. doi 10.2478/v10098-010-0006-0.
- [7] (UCAR), University Corporation for Atmospheric Research. CLM Home. 2019. <http://www.cgd.ucar.edu/tss/clm/>
- [8] BÖHM, U., KÜCKEN, M., AHRENS, W., BLOCK, A., HAUFFE, D., KEULER, K., ROCKEL, B. and WILL, A. CLM – the climate version of LM: brief description and long-term applications. *COSMO Newsl.* 2006. Vol. 6, p. 225–235.
- [9] BURN, D. H. Catchments similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *Journal of Hydrology*. 1997.
- [10] MANN, Henry B. Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*. July 1945. Vol. 13, no. 3, p. 245. doi 10.2307/1907187. <https://www.jstor.org/stable/1907187?origin=crossref>
- [11] KENDALL, M. G. *Rank Correlation Methods*. 1975. Griffin, London.
- [12] MENABDE, Merab, SEED, Alan and PEGRAM, Geoff. *A simple scaling model for extreme rainfall*. 1999. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/1998WR900012>
- [13] YU, P. -SH, YANG, T. - CH. and LIN, CH. - SH. Regional rainfall intensity formulas based on scaling property of rainfall. *Journal of Hydrology*. 2004. Vol. 295, no. 1–4, p. 108–123.
- [14] FÖLDES, Gabriel and LABAT, Marija Mihaela. METÓDY ANALÝZ BUDÚCICH ZMIEN V CHARAKTERISTIKÁCH INTENZÍT KRÁTKODOBÝCH ZRÁŽOK. *Zborník prednášok z Konferencie mladých výskumníkov - KOMVY 2018*. 2018. Vol. 1, no. 1, p. 12–20. ISBN 978-80-227-4847-6.

Anita Keszeliová¹

Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, tretí ročník

ZMENY ÚHRNNÉHO VÝPARU VO VYBRANÝCH POVODIACH SR

CHANGES OF TOTAL EVAPORATION IN SELECTED CATCHMENTS OF THE SR

Abstract

The article deals with the general principles of the water balance of catchments in general, which reflects the relationship between income and expenditure of water and compares the estimate of the real evapotranspiration between two periods in selected catchments.

Kľúčové slová

Hydrologická bilancia, úhrnný výpar, CarpatClim,

1. Úvod

Vo vodnom hospodárstve diferencujeme rôzne druhy bilancie vody, na ktoré má závažný vplyv zmena klímy.

V prvom rade pre nás najdôležitejšou bilanciou bude hydrologická bilancia, ktorá vymedzuje priestorovú jednotku, najčastejšie povodie, prvky obehu vody v prírode za daný časový interval (Zhang, 2004).

Hydrologická bilancia podľa technickej normy (STN 75 0110) je definovaná ako vyhodnotenie prírastkov a úbytkov množstva vody a zmeny jej akumulácie vo vodnom útvere za zvolený časový interval.

Rovnicu hydrologickej bilancie podľa Parajka (2001) môžeme zjednodušené použiť tak, že berieme do úvahy len Z , O , V , ktoré sú dlhodobé priemery atmosférických zrážok, odtoku a územného výparu.

Členy bilančnej rovnice sa navzájom podmieňujú. Predpokladom územného (úhrnného) výparu je vlaha, ktorá závisí od zrážok. Úhrnný výpar stúpa s úhrnom zrážok, avšak ju ovplyvňujú aj ďalšie faktory ktoré určujú hornú medzu nad ktorú ročný úhrn výparu nevystúpi.

Z toho vychádza, že zväčšenie ročného výparu sa mení so zväčšením zrážok tak, že pri nízkych zrážkach sa celý ich úhrn vyparí, a naopak, ak zrážky dosiahnu určitú hranicu, po jej prekročení úhrn výparu už nestúpa (Parajka, 2001).

Cieľom príspevku je detekcia zmien hydrometeorologickej bilancie v časových radoch v podmienkach klimatickej zmeny. Článok sa zameriava na aplikáciu bežných postupov pre detekciu zmien v chovaní meraných a odvodených hydrometeorologických radov na vybraných povodiach.

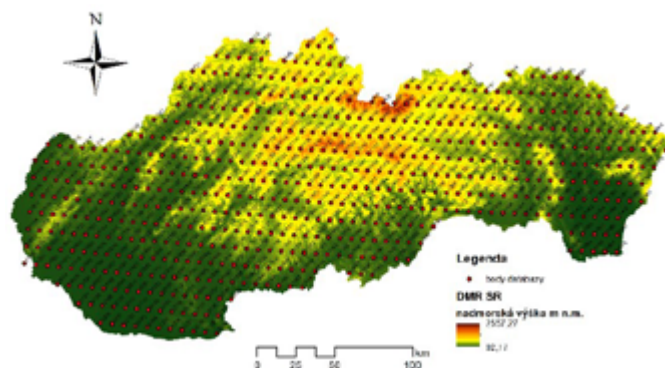
2. Vstupné údaje a metodika ich spracovania

Projekt CarpatClim je európska spolupráca ôsmich krajín (Maďarsko, Slovensko, Srbsko, Česko, Poľsko, Ukrajina, Rumunsko, Chorvátsko), ktorých cieľom je podrobný výskum priestorového a časového pozorovania klímy Karpatského oblúka, vrátane Panónskej nížiny, Sedmohradska a ako aj niektorých susediacich území pomocou jednotných, resp. porovnateľných metód.

¹ Anita Keszeliová, Mgr., Radlinského 11

Hlavným cieľom projektu bolo zlepšenie dostupnosti a prístupnosti homogénnych a priestorovo reprezentatívnych časových radov klimatologických údajov, ktoré sú spracované v gridovej mriežke 0.1 x 0.1 stupňov, t.j. cca 10x10 km (Slovenskú prislúchajú body od 524 do 2240, Obr.1). Okrem toho, cieľom projektu je aj vytvorenie databázy pre hodnotenie klímy a ďalšie klimatologické štúdia, ako napr.: monitorovanie sucha.

V online databáze CarpatClim Projekt sú dostupné údaje za obdobie od roku 1961 do 2010, tieto dáta slúžia ako podklad pre analýzu klímy. Databáza bola tvorená 12 partnerskými organizáciami z 8 krajín, a dostupných je 74 klimatologických prvkov, ktoré boli spracované z 10 000 meteorologických staníc. Dáta sú dostupné na webovej stránke projektu (w1).



Obr. 1 Rozdelenie bodov databázy CarpatClimu na území Slovenska

V rámci príspevku boli použité údaje z databázy CarpatClim, a to konkrétne mesačné úhrny atmosférických zrážok a priemerné mesačné teploty vzduchu. Pre potrebu výpočtu zrážky a teploty na povodie sa zvolila metóda Thiessenových polygónov, kde priemerný zrážkový úhrn v povodí sa počíta ako vážený priemer údajov z jednotlivých meteorologických staníc (v tomto prípade bodov databázy CarpatClim). Za váhu je považovaná veľkosť územia priradená k príslušnej stanici v rámci povodia. Veľkosť váh sa stanovuje vytvorením mnohoúhelníkovej siete, kde sa uvažujú aj susediace body CarpatClimu k danému povodiu.

Ďalším prvkom hydrologickej bilancie je odtok z povodia (územia). Prietokové údaje boli poskytnuté z databázy SHMÚ, a to v mesačnom kroku za celé pozorované obdobie pre vybrané záverečné profily vo zvolených povodiach. Údaje priemerného mesačného prietoku boli prepočítané na priemerný ročný prietok za kalendárny rok, ako vážený priemer počtu dní v danom mesiaci. A následné ročné prietoky Q [m³/s] boli prepočítané na odtokovú výšku v [mm] z povodia.

Cieľom príspevku bolo identifikovanie vývoja úhrnného výparu za dlhé obdobie 1961-2010 v ročnom kroku (kalendárny rok), ako aj porovnanie dvoch 30-ročných období (1961-1990, 1981-2010). Výber obdobia je ovplyvnený dostupnosťou údajov z databáz.

Úhrnný výpar sme stanovili pomocou vzorca:

$$V = Z - O \quad (1)$$

kde Z sú zrážky v [mm] a O je odtoková výška v [mm] v danom povodí.

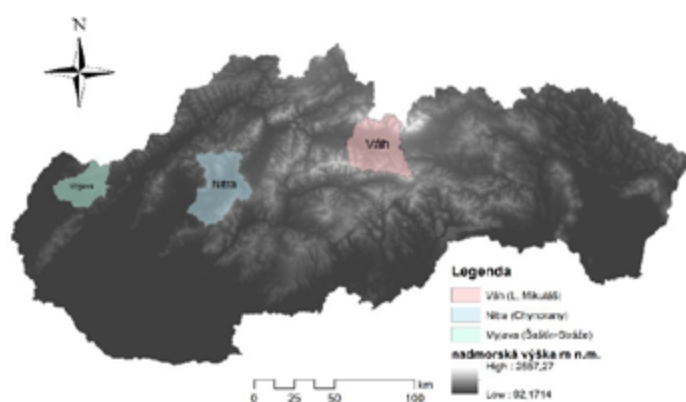
3. Výsledky práce

V príspevku sú uvedené výsledky vybraných troch čiastkových povodí, ktoré sú západno-východnom transekte cez územie Slovenska (Obr. 2). Na západe v povodí Moravy bolo vybrané čiastkové povodie Myjavy so záverečným profilom Šaštín – Stráže plocha. Územie sa nachádza na

Západopanónskej panve, v geomorfologickom oblasti Záhorskej nížine, presnejšie na Borskej nížine (w3). Charakteristické pre územie sú pieskové presypy tvarom pretiahnutých, nízkych chrbtov. (w2)

Druhé povodie bolo vybrané na toku Nitra so záverečným profilom Chynorany (ID 6640), kde prislúchajúca plocha povodia je 1124,06 km². Podľa geomorfologického členenia povodie leží na Západopanónskej panve, presnejšie na Podunajskej pahorkatine (w3). Na území je prírodná rezervácia (PR) Chynorianský luh. PR je jediným zbytkom pôvodného lužného lesa Hornej Nitry, s typickým charakterom tvrdého luhu skupiny lesných typov brestových jasenín s hrabom. Významný je biotop rastlinstva a živočíšstva, najmä vtáctva lužného lesa (w4).

V povodí Váhu bolo vybrané čiastkové povodie horného Váhu (záverečný profil L. Mikuláš ID 5550). Plocha povodia sa rozprestiera na 1101,41 km². Podľa geomorfologického členenia povodie sa nachádza v subprovincii Vnútrotných Západných Karpát vo Fatransko – tatranskej oblasti, presnejšie v Podtatranskej kotline (w2). Klimatické pomery povodí patria do chladnej oblasti.



Obr. 2 Vybrané čiastkové povodia v rámci Slovenska

Základné charakteristiky vybraných čiastkových povodí sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

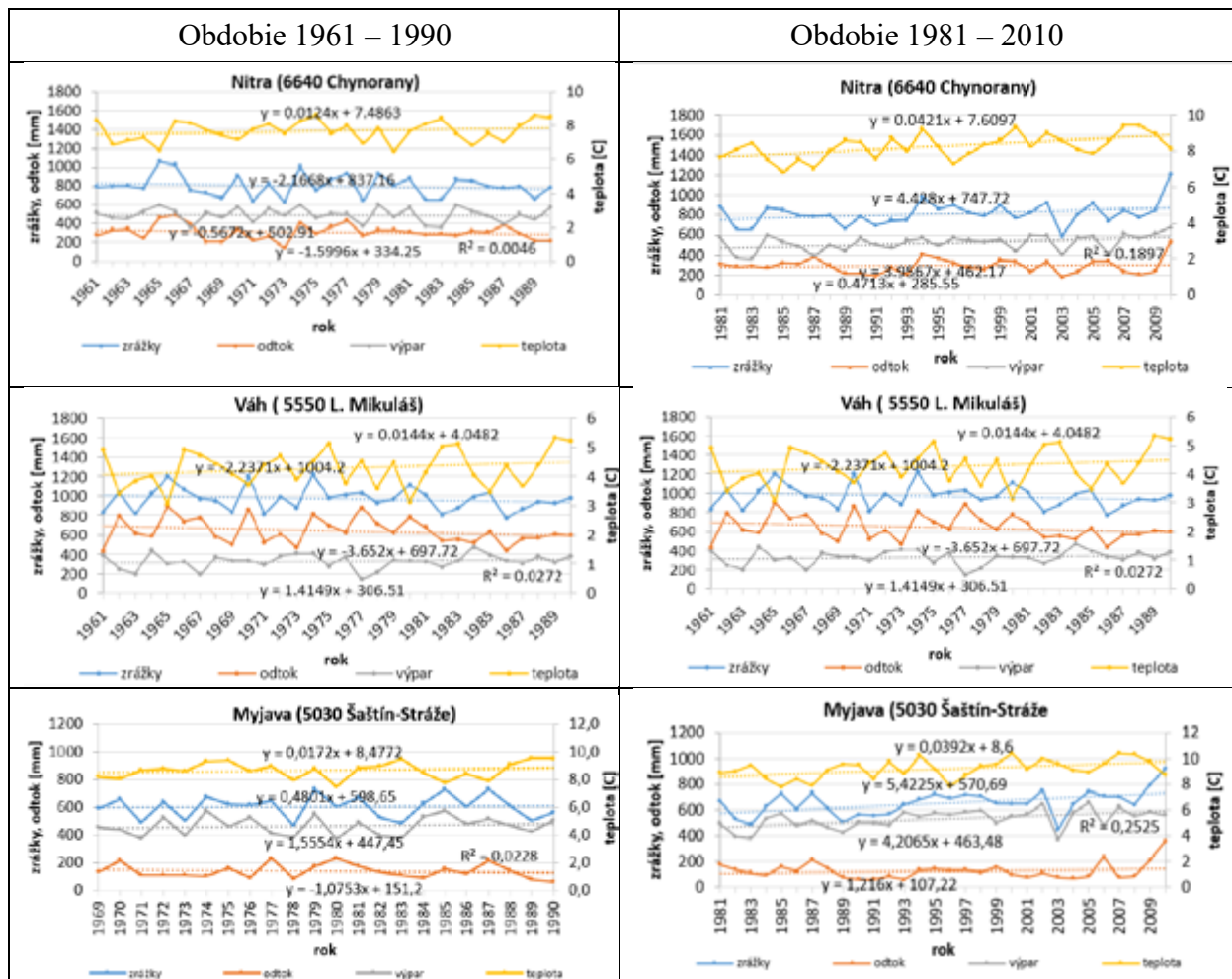
Tab. 1 Základné charakteristiky vybraných čiastkových povodí

| Povodie | Záverečný profil (vodomerná stanica) | Plocha povodia [km ²] | Max (min) nadmorská výška [m n.m.] | Lesnatosť územia [%] |
|-----------|---|---|--|----------------------------|
| 1. Myjava | Šaštín Stráže (5030) | 644,89 | 792 (172) | 35 |
| 2. Váh | Liptovský Mikuláš (5550) | 1101,41 | 1690 (597) | 75 |
| 3. Nitra | Chynorany (6640) | 1124,06 | 1180 (191) | 60 |

V prvom kroku boli vynesené priemerné ročné teploty, ročné úhrny zrážok na povodie a odtoková výška za celé sledované obdobie.

Ďalej sa hodnotili prvky hydrologickej bilancie v dvoch obdobiach, kde celkové dostupné údaje z rokov 1961 - 2010 boli rozdelené na dve 30 ročné obdobia. Cieľom tohto príspevku bolo identifikovať možnú zmenu v úhrnom výpare. Na obrázku 3 sú uvedené grafické výstupy priebehu

časových radov ročného úhrnu zrážok, ročný odtok z povodia, ročný úhrnný výpar a priemerná ročná teplota pre hodnotené obdobie.



Obr. 3 Priebehy časových radov (ročný úhrn zrážok, ročný odtok z povodia, ročný úhrnný výpar a priemerná ročná teplota pre hodnotené obdobie)

V tabuľke 2 sú uvedené prvky hydrologickej bilancie sumárne, rozdiel v úhrnom výpare a priemerná ročná teplota za obe porovnávané obdobie.

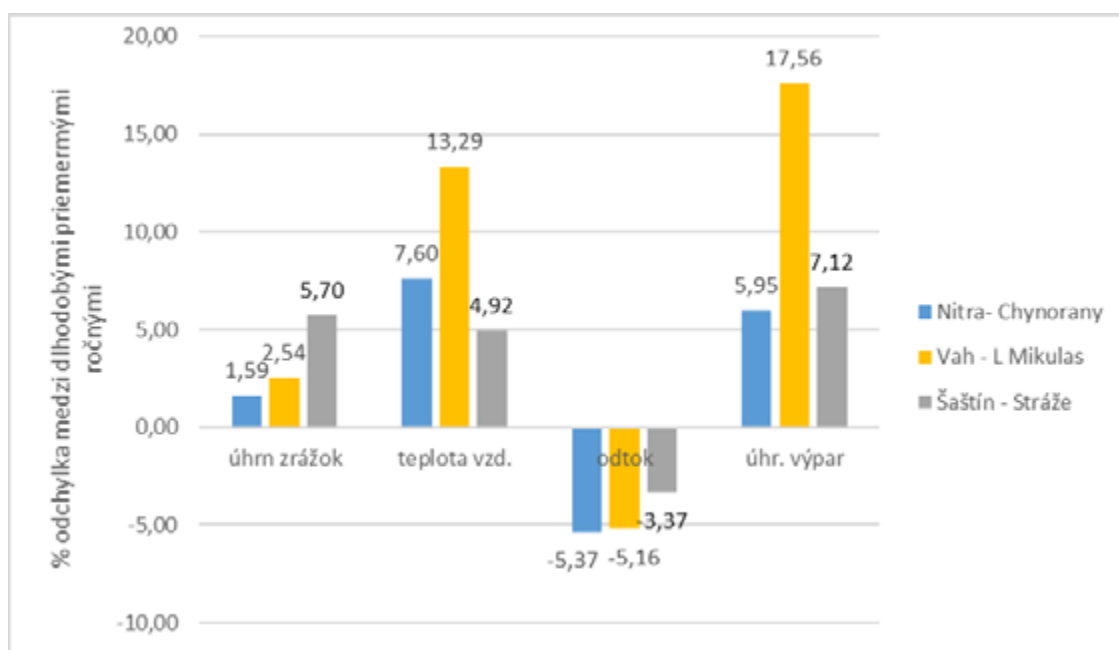
Tab. 2. Ukážka určených prvkov – teploty vzduchu, úhrnu zrážok, odtoku a úhrnného výparu v ročnom kroku (kalendárny rok)

| | obdobie 1961-1990 | | | | obdobie 1981-2010 | | | |
|----|-------------------|------------------------|---------------|-------------------------|-------------------|------------------------|-----------------|-------------------------|
| | zrážky [mm] | teplota vzd. [C] | odtok [mm] | úhrnný výpar [mm] | zrážky [mm] | teplota vzd. [C] | prietok [mm] | úhrnný výpar [mm] |
| 1. | 18583,5 | 8,8 | 2523,9 | 16059,6 | 18644,3 | 9,2 | 2439,0 | 17203,3 |
| 2. | 29086,7 | 4,3 | 19233,6 | 9853,1 | 29825,1 | 4,8 | 18241,5 | 11583,6 |
| 3. | 24107,4 | 7,7 | 9283,8 | 14823,6 | 24490,6 | 8,3 | 8785,5 | 15705,0 |

V nasledujúcej tabuľke je prehľad rozdielov jednotlivých prvkov v skúmajúcich obdobiach, ktorá udáva či ide o stúpajúci/klesajúci trend prvku v čase pre analyzované obdobia (Tab. 3).

Tab. 3. Rozdiel medzi obdobiem (1981-2010) - (1961-1990)

| | zrážky [mm] | teplota vzd. [C] | odtok [mm] | úhrný výpar [mm] | |
|----|----------------|---------------------|---------------|---------------------|----------|
| 1. | 60,8 | 0,4 | -84,9 | 1143,7 | zvýšenie |
| 2. | 738,5 | 0,6 | -992,0 | 1730,5 | zniženie |
| 3. | 383,2 | 0,6 | -498,2 | 881,4 | |



Obr. 4. Percentuálna odchýlka medzi dlhodobými priemernými ročnými hodnotami medzi hodnotiacimi obdobiemi

Podľa percentuálneho rozdielu môžeme konštatovať (Obr. 4), že priemerná dlhodobá ročná hodnota odtoku má klesajúci charakter. V dlhodobom úhrne zrážok bol zistený mierny nárast a so stúpajúcou teplotou sa očakávané zvýšil úhrnný výpar.

4. Diskusia a závery

V prvej fáze dizertačnej práce je plánované využiť a analyzovať informácie v disponibilných gridových hydrologických a meteorologických údajoch v SR v 49 povodiach podľa prezentovanej metódy. Budú zhodnotené ako vývoj tak aj zmena monitorovaných klimatických a hydrologických prvkov. Ďalším cieľom je aj porovnanie vývoja monitorovaných klimatických a hydrologických prvkov so staršími scenármi klimatickej zmeny. Trendy prvkov hydrologickej bilancie sú v súlade so zmenami hydrologickej bilancie.

PodĎakovanie

Článok vznikol vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

- [1] ZHANG L., HICKEL K., DAWES W.R., CHIEW F.H.S., WESTERN A. W., BRIGGS P.R., 2004: A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration, Water resources research, vol. 40(2), 1-14, doi:10.1029/2003WR002710
- [2] STN 75 0110, Vodné hospodárstvo, Hydrológia, Terminológia. ICS: 01.040.07;07.060
- [3] PARAJKA J., 2001: Mapovanie dlhodobého priemerného ročného odtoku na území Slovenska, Dizertačná práca, Katedra Vodného hospodárstva krajiny, Stavebná fakulta v Bratislave,

Internetové zdroje:

(w1) <http://www.carpatclim-eu.org/pages/home/>.

(w2) <https://apl.geology.sk/mapportal/img/pdf/tm19a.pdf>

(w3)

<https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=14491b3a7f0b43aa98bbe22e96a614>

[9a](#)

(w4) <http://uzemia.enviroportal.sk/main/detail/cislo/54>

*Martin Kubáň*¹

Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, 2. ročník

SIMULÁCIA VLHKOSTI PÔDY NA VYBRANÝCH RAKÚSKYCH POVODIACH S KONCEPČNÝM SEMI-DISTRIBUOVANÝM ZRÁŽKOVO ODTOKOVÝM MODELOM TUW

SOIL MOISTURE SIMULATION IN SELECTED AUSTRIAN CATCHMENTS WITH THE USE OF THE CONCEPTUAL SEMI-DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF MODEL TUW

Conceptual semi-distributed rainfall runoff model is a reliable tool for simulation of the hydrologic characteristics for different types of catchments. Volume of water in soil layer of the catchment is one output from the model. This model does not to be relevance for the all kinds of catchments, for that reason we decide for testing model in various type of catchment. We select three Austrian catchments with flat, hilly and alpine character. We calibrate TUW model and simulate soil moisture. Subsequently, we monitored how the soil component of the model reacts for rainfall. We also detect differences about, how soil moisture changes with the type of catchment. Simulation show to us that soil moisture component of the model provides to us a reliable results, but there is a necessity to test model in more cases.

Kľúčové slová: TUWmodel, pôdna vlhkosť, Rakúsko,

1. Úvod

Vlhkosť pôdy má dôležitú úlohu pre formovanie odtoku z povodia, energetickej bilancie povodia, výskytu sucha alebo povodní a mnohých ďalších hydrologických charakteristík. Určenie pôdnej vlhkosti je veľmi dôležité pre správne hospodárenie s vodou v povodí. Tradičné meranie vlhkosti pôdy je ale veľmi zložitý a hlavne zdĺhavý proces. V prípade, ak by sme dokázali rýchlo vyhodnocovať množstvo vody v pôdnej zložke povodia, dokázali by sme tak pohotovo reagovať na rýchle hydrologické zmeny v povodiach. Včasné reakcie na náhle hydrologické zmeny, akými sú povodne spôsobené nasýtenou pôdnou vrstvou alebo suchá, pri ktorých je naopak vody v pôde málo by sme efektívnejšie zabránili ničivým účinkom povodní a zefektívnilí hospodárenie s vodou v krajine. Z-o modely sú už desaťročia účinné pri určovaní množstva vody v pôdnej zložke povodia. Tento spôsob je účinný, keď máme v danom povodí zrážkomerné stanice a údaje o aktuálnom odtoku z povodia. Problémy však často nastávajú pri rozdielnych typoch povodí. Týmito problémami sa v minulosti zaoberalo veľa autorov [7], [8], [4], [2].

Ceola a [1] Parajka [5] sa zaoberali rozsahom parametrov pre model TUW pre kalibrácie a validácie v dennom kroku, tieto rozsahy parametrov sme použili aj v tejto práci. S rovnakými rozsahmi parametrov Slezia [7] testovali z-o model TUW na 213 rakúskych povodiach, ktoré mali rozdelené na dve skupiny, skupinu s dažďovým režimom odtoku a skupinu so snehovým režimom odtoku. Model nakalibrovali v kalibračnom období 1981-1990 a validovali v období 2001-2010.

¹ Martin Kubáň, Ing., Radlinského 11. 810 05 Bratislava

V ďalšej práci Sleziač [8] testovali vhodnosť štruktúry modelu pre dané povodie. V práci zistili, že verzia so semi-distribučnými parametrami dosahovala vyššie hodnoty ukazovateľa NSE (Nash-Sutcliffe) ako celistvá verzia modelu. Aj preto sme sa rozhodli v našej práci použiť semi-distribučnú verziu modelu .

V našej práci sme nadviazali na predošlé štúdie. Zaoberali sme sa vhodnosťou TUV modelu na rozličné typy povodí na základe ich výškového členenia a skúmali sme komponent pôdnej vlhkosti. Vybrali sme si povodia v Rakúsku, (pretože na Slovensku nemáme povodia alpského typu). K dispozícii sme mali vstupné údaje pre obdobie 2007-2014. V našej verzii modelu sú povodia a aj vstupy rozdelené do výškových zón po 200m. Plocha vybraných povodí bola: rovinaté (164km²), kopcovité (125,1km²) a alpské (164,7km²). V prvej časti sme nakalibrovali model a následne sme použili parametre z kalibrácie na simuláciu vlhkosti pôdy. Na záver sme pozorovali, ako simulované vlhkosti pôdy reagujú na padnuté úhrny zrážok. Výsledky sme v závere vyhodnotili a prediskutovali.

2. Opis povodí

Pre našu prácu sme vybrali tri rakúske povodia. Nížinaté, hornaté a alpské, aby sme videli ako model reaguje na rozličné typy povodí. Rovinaté povodie sa nachádza pri obci Forchtenau v nadmorskej výške 400-800 m n.m. v hornom Rakúsku a merná stanica Haging sa nachádza na rieke Antiesen, plocha povodia je 164 km². Kopcovité povodie sa nachádza na rieke Grundlseetraun v nadmorskej výške 600-2400 m n.m. a merná stanica má názov Archkogel plocha povodia je 125,1km². Alpské povodie sa nachádza na západe Rakúska na hraniciach s Talianskom v národnom parku Oztal v nadmorskej výške 2000-3600 m n. m.. Merná stanica Vent je na rieke Venter Ache a plocha povodia je 164,7 km².



Figure 2.1: Vyznačenie vybraných povodí rovinaté(zelená), kopcovité(modrá) a alpské (červená).

3. Hydrologický model TUV

Koncepčný semi-distribovaný z-o model TUV („Technische Universität Wien“) [5] je model vyvinutý na technickej univerzite vo Viedni. Ide o model kopírujúci štruktúru modelu HBV [3], pracuje v dennom časovom kroku. Model je rozdelený do výškových zón po 200m. Ide o model hydrologickej bilancie, ktorý sa snaží prispôbiť jednotlivé komponenty modelu tak, aby sa objem vody na vstupe rovnal množstvu na výstupe. Model TUV sa skladá z troch submodelov: Snehový, pôdny a odtokový. V našej práci nás bude zaujímať pôdny submodel. Snehový submodel obsahuje parametre: snehový korekčný koeficient (SCF), parameter denných teplôt (DDF), teploty topenia a mraznutia snehu (T_r , T_s , T_m). Pôdny submodel simuluje procesy, ktoré sa odohrávajú pod zemským povrchom. Tento submodel obsahuje parametre: limitná hodnota pre potenciálnu evapotranspiráciu (L_{prat}), kapacitu vody v pôde (FC) a parameter pre tvorbu odtoku (BETA). Na simuláciu priebehu povrchového a podpovrchového odtoku slúži odtokový submodel. V tomto sub modeli sa nachádzajú parametre: parametre pre povrchový, podpovrchový a základný odtok (k_0 , k_1 a k_2), parameter pre základný odtok (B_{max}), pre aktuálnu zásobu vody v pôde (L_{suz}), a parameter transformácie odtoku (Croute).

4. Kalibrácia zrážkovo-odtokového modelu TUV

Model sme kalibrovali a validovali v období 2007 – 2014. Kalibrácia prebehla na základe 15 parametrov [1], ktoré boli optimalizované pomocou lineárnej kombinácie kritérií Nash-Sutcliffovho koeficientu (NSE) a logaritmickeho Nash-Sutcliffovho koeficientu (logNSE). Bola použitá automatická kalibrácia pomocou diferenciálneho evolučného algoritmu Deoptim. Ukazovateľmi zhody simulovaných a meraných prietokov boli koeficienty: Nash-Sutcliffe (NSE) a logaritmickeho Nash Sutcliffe (logNSE). Na optimalizovanie výsledkov sme použili funkciu $(NSE + \logNSE)/2$ [7].

Vstupnými údajmi do modelu boli merané priemerné hodnoty, ktoré boli rozdelené do výškových zón po 200m, boli to údaje o úhrne zrážok, teplote vzduchu, potenciálnej evapotranspirácii a meraných prietokoch v záverečnom profile povodia.

Table 4.1 Tabuľka povodí s účinnosťou kalibrácie

| Označenie povodia | Typ | Plocha (km ²) | Meračská stanica | Rieka | Nash-Sutcliffe | logaritmickeý Nash Sutcliffe | Objemová chyba (%) |
|-------------------|-----------|---------------------------|------------------|----------------|----------------|------------------------------|--------------------|
| 201368 | Alpské | 164,7 | Vent | Venter Ache | 0,92 | 0,98 | -0,11 |
| 204750 | Rovinaté | 164,9 | Haging | Antiesen | 0,70 | 0,63 | 0,10 |
| 210526 | Kopcovité | 125,1 | Archkogel | Grundlseetraun | 0,76 | 0,82 | 0,02 |

V tabuľke 4.1 môžeme vidieť, že model sa podarilo nakalibrovať na vysoké hodnoty NSE. Môžeme však vidieť že model sa pri kalibrácii správal lepšie v hornatejších a alpských povodiach.

5. Simulácia vlhkosti pôdy

Na simuláciu vlhkosti pôdy sme použili parametre z kalibrácie. Simuláciu sme spustili v období 2007-2014. Sledovali sme ako sa vlhkosť pôdy správa k padnutým úhrnom zrážok. Chceli sme vidieť, či pôdny komponent modelu reaguje na pribúdajúce zrážky.

Výsledky sme zobrazili v grafoch vybrali sme kalendárny rok 2009. Z výsledkov sme zistili, že model najlepšie fungoval na rovinnatom povodí. V celom priebehu vlhkosti pôdy bolo vidieť, že model reaguje na padnuté jarné a jesenné zrážky a zároveň reagoval na suché letné obdobie. Model sa tak správal aj napriek tomu, že ukazovateľ zhody Nash-Sutcliffe bol z pomedzi uvedených povodí najnižší. V kopcovitých oblastiach na povodí Archkogl sme mohli vidieť, ako model reagoval vzhľadom na nadmorskú výšku povodia. V spodných častiach povodia (600 m n. m.) model zachytil nástup jarných zrážok a letného suchšieho počasia. Vo vrchnej časti povodia (2200 m n. m.) model reagoval na zimné obdobie poklesom vlhkosti pôdy (zamrznutá pôda) a po následnom roztopení snehu nárastom vlhkosti pôdy. V alpskej oblasti bolo jasne viditeľné, že pôda bola po celý čas zamrznutá.

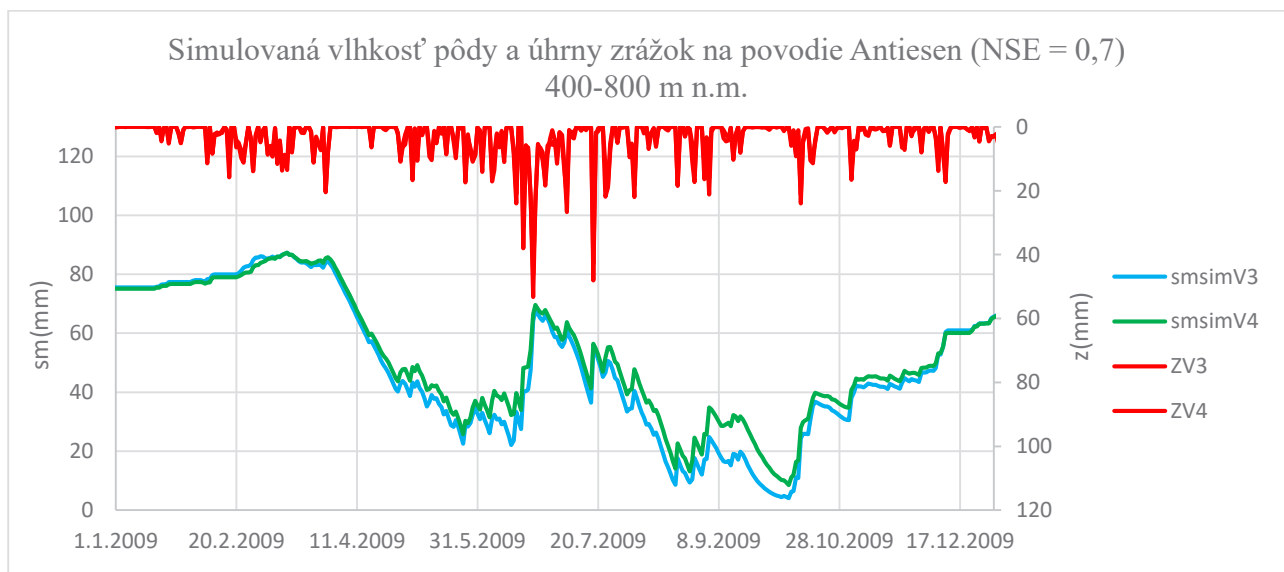


Figure 5.1 Simulovaná vlhkosť pôdy a úhrny zrážok na povodie Antiesen (NSE = 0,7) 400-800 m n.m.

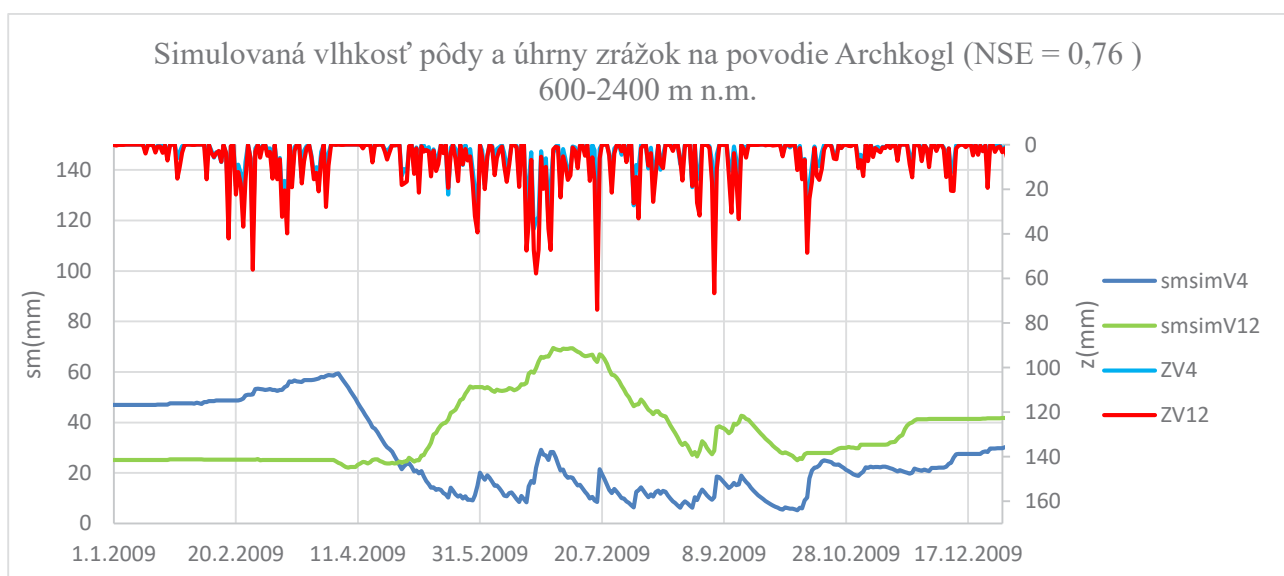


Figure 5.2 Simulovaná vlhkosť pôdy a úhrny zrážok na povodie Archkogl (NSE = 0,83) 600-2400 m n.m.

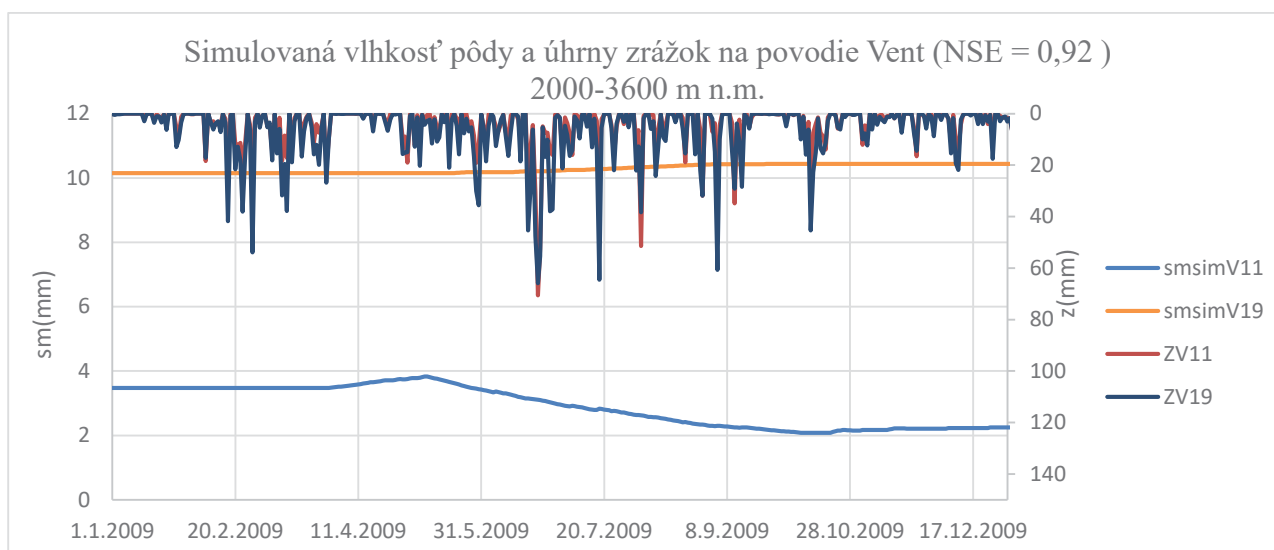


Figure 5.3 Simulovaná vlhkosť pôdy a úhrny zrážok na povodie Vent (NSE = 0,92) 2000-3600 m n.m.

V grafoch sú vyznačené spadnuté úhrny zrážok a simulovaná vlhkosť pôdy (napr. ZV3 = zrážky vo výškovej zóne 3 t.j. 400-600 m n.m. a smsimV3 t.j. simulovaná vlhkosť pôdy vo výškovej zóne 3)

6. Záver

V tejto práci sme si overili, ako pracuje model TUW na výškovo rozličných povodiach Rakúska. Model bol nakalibrovaný na základe 15 parametrov [1], ktoré boli optimalizované pomocou lineárnej kritérie Nash-Sutcliffovho koeficientu (NSE) a logaritmickeho Nash-Sutcliffovho koeficientu (logNSE). Bola použitá automatická kalibrácia pomocou diferenciálneho evolučného algoritmu Deoptim..

V prvej časti sme nakalibrovali model na obdobie 2007-2014 a následne sme so získanými parametrami spustili simuláciu vlhkosti pôdy. Výsledky sme vyniesli do grafov. Vybrali sme rok 2009, ktorý bol v danom období priemerný. Sledovali sme ako, sa správala simulovaná vlhkosť pôdy vzhľadom na spadnuté úhrny zrážok. V rovinatej časti povodia model dobre reagoval na úhrny zrážok, zachytil jarné topenie snehu a aj letné obdobie sucha. V hornatej časti povodia bolo vidieť rozdiel medzi dolnou (600m n.m.) a hornou časťou povodia (2200 m n.m.). V dolnej časti povodia sa model správajú ako v rovinatej časti a naopak, v hornej bolo jasne viditeľné dlhšie obdobie so snehovou pokrývkou a následne neskoršie topenie snehu. V alpskej časti povodia bolo jasne vidieť že pôda je po celý čas zamrznutá a vlhkosť pôdy sa takmer nemenila.

Cieľom tejto práce bolo otestovať, ako sa správa pôdna komponent v semi-distribúvanom zrážkovo odtokovom modeli TUW. Toto testovanie je pre nás dôležité z hľadiska ďalšej práce s týmto modelom. Model sa v tomto smere ukázal ako spoľahlivý nástroj na určovanie pôdnej vlhkosti.

Literatúra

- [1] CEOLA, S., et al., 2015: Virtual laboratories: new opportunities for collaborative water science. Supplement of Hydrol. Earth Syst. Sci., 19, 2101–2117, doi:10.5194/hess-19-2101-2015-supplement,
- [2] CORON, L., Andréassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M., Hendrickx, F., 2012: Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216
- [3] Harlin, J. 1991. Development of a process oriented calibration scheme for the HBV hydrological model (Vývoj kalibračného postupu pre hydrologický model HBV). Nord. Hydrol., 22, s. 15-36. Australian catchments, Water Resour. Res., 48, W05552, doi:10.1029/2011WR011721.
- [4] MERZ, R., Parajka, J., Blöschl, G., 2011: Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses, Water Resour. Res., 47, W02531, doi: 10.1029/2010WR009505.,
- [5] PARAJKA, J., Merz, R., Blöschl, G., 2007: Uncertainty and multiple calibration in regional water balance modelling case study in 320 Austrian catchments. Hydrol. Process, 21, 435 – 446, doi: 10.1002/hyp.
- [6] PARAJKA, J., Naiemi, V., Blöschl, G., Komma, J., 2007: Matching ERS scatterometer based soil moisture patterns with simulation of a conceptual dual layer hydrologic model over Austria. Hydrol. Earth Syst. Sci. 13, 259-271, 2009
- [7] SLEZIAK, P., Hlavčová, K., Szolgay, J., Parajka, J., 2017: Závislosť kvality simulácie odtoku pomocou zrážkovo-odtokového modelu od rozdielnosti hydro-klimatických podmienok kalibračného a validačného obdobia. Acta Hydrologica Slovaca, ročník 18, č. 1, 23 – 30.
- [8] SLEZIAK, P., Hlavčová, K., Szolgay, J., Parajka, J., Duethman, D., Danko, M., 2018: Factors controlling alterations in the performance of a runoff model in changing climate conditions. J. Hydrol. Hydromech., 66, , 4, 381-392. doi:10.2478/johh-2018-0031.

Marija Mihaela Labat¹

Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, 3. ročník

VPLYV ZMENY VYUŽITIA ÚZEMIA A KLIMATICKÝCH ZMIEN NA ODTOK V MALOM HORSKOM POVODÍ

IMPACT OF THE LAND USE AND CLIMATE CHANGES ON THE RUNOFF IN A SMALL MOUNTAINOUS CATCHMENT

Abstract

The paper focuses on estimation of the changes in runoff caused by changes in land use and climate. The study is performed in the Ipoltica River basin, located in the Low Tatra National Park in Slovakia. The first part of the paper focuses on the changes in runoff caused by changes in land use for the period from 1990 to 2018. In the second part the changes in runoff caused by climate change are estimated. The climate change is represented by data from the Regional Climate Model scenario. The design floods are calculated using the Soil Conservation Service - Curve Number method.

Kľúčové slová: zmena využitia územia; klimatické zmeny; návrhový prietok; SCS-CN metóda.

1. Úvod

V poslednom období, extrémne povodňové udalosti vrátane bleskových a bahenných povodní zasiahli ako Európu, tak aj Slovensko. Na vznik povodní vplyvajú nielen prirodzené príčiny ako sú zrážky a topenie snehu, ale aj príčiny ekonomického, sociálneho, a ekologického charakteru. Tieto príčiny sa medzi sebou navzájom ovplyvňujú, a preto na analýzu ich vplyvu je nutná spolupráca viacerých odvetí [1]. Aj keď sú zrážky najdôležitejšie externé faktory, ktoré ovplyvňujú výskyt povodní, pozornosť si vyžaduje aj mierka a intenzita pomalých zmien využitia územia [2], ako napr. zmeny v lesnom hospodárstve [3, 4], zvýšená ochrana ekosystémov a prírodných opatrení na zachytávanie vody, zmena vegetácie ako odozva na klimatické a ekologické zmeny, zmeny legislatívy [5] a pod. Na rozdiel od pomalých zmien využívania územia, existujú aj náhle, lokálne činitele ako sú lesné požiare [6] a veterné a snehové kalamity [7], ktoré sú ťažšie predvídateľné.

Veterné kalamity ovplyvnili zloženie lesného porastu aj na území povodia rieky Ipoltica, z ktorých najvýznamnejšie boli veterné kalamity Alžbeta v roku 2004 a Kyrill a Filip v roku 2007. Z toho dôvodu sa prvá časť článku zaoberá vplyvom zmien využitia územia spôsobených prevažne odlesnením na odtok. Druhá časť článku sa sústreďuje na vplyv klimatických zmien na odtok, ktoré sú reprezentované údajmi zo CLM regionálneho klimatického scenára [8]. Pri výpočte odtok bol počítaný ako návrhový kulminačný prietok pomocou SCS-CN metódy.

2. SCS-CN metóda

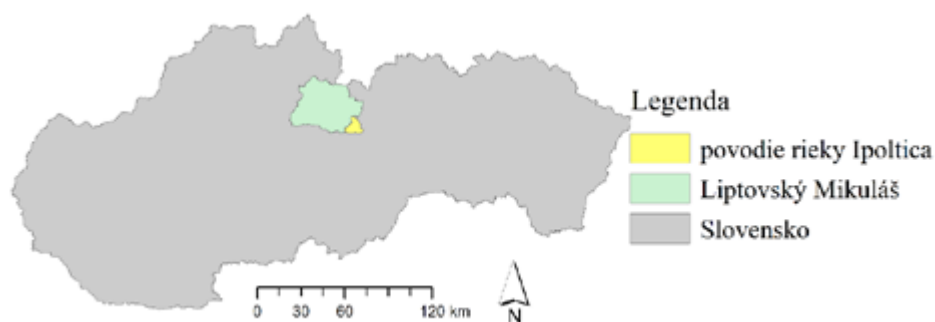
SCS-CN metóda (Soil Conservation Service Curve Number) bola vyvinutá Americkým úradom pre ochranu pôdy [9, 10]. Táto empirická metóda bola odvodená na základe mnohoročných

¹ Marija Mihaela Labat, Ing, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra vodného hospodárstva krajiny, Radlinského 11, 813 68, Bratislava, Slovenská republika, marija.labat@stuba.sk

pozorovaní odtoku z malých poľnohospodársky využívaných povodií v rôznych oblastiach USA. V súčasnosti je táto metóda prispôbená podmienkam aj v iných častiach sveta. Využíva sa na určenie výšky priameho odtoku z malých povodií pre jednotlivé zrážkovo-odtokové udalosti pri nedostatku priamych pozorovaní. Rozsah hodnoty parametra CN (CN číslo) sa pohybuje v rozpätí 0-100 [11].

3. Opis povodia

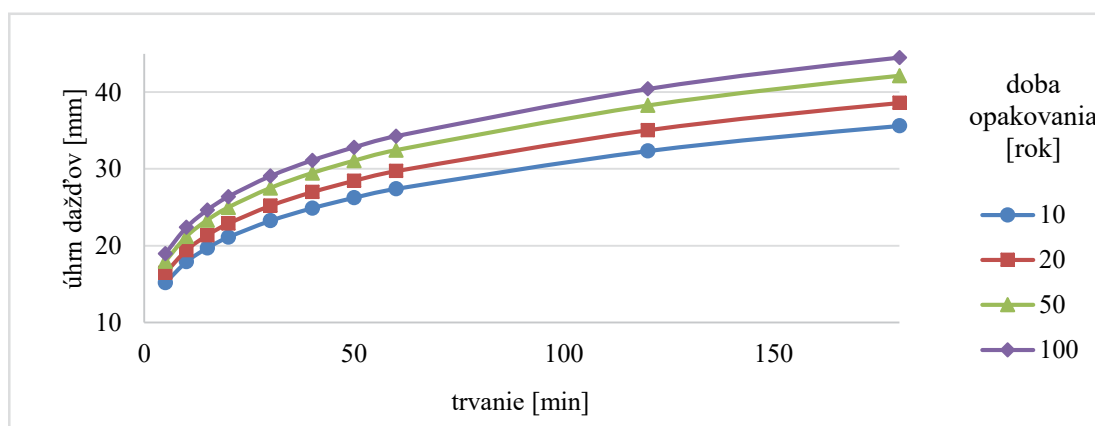
Povodie rieky Ipoltica sa nachádza v okrese Liptovský Mikuláš, v Národnom parku Nízke Tatry (NAPANT) na Slovensku (obrázok 1). Povodie rieky Ipoltica so záverečným profilom vodomerná stanica Čierny Váh má plochu 86.25 km². Prameň toku Ipoltica je v Nízkych Tatrách v nadmorskej výške 1405 m n. m.



Obrázok 1: Poloha povodia rieky Ipoltica

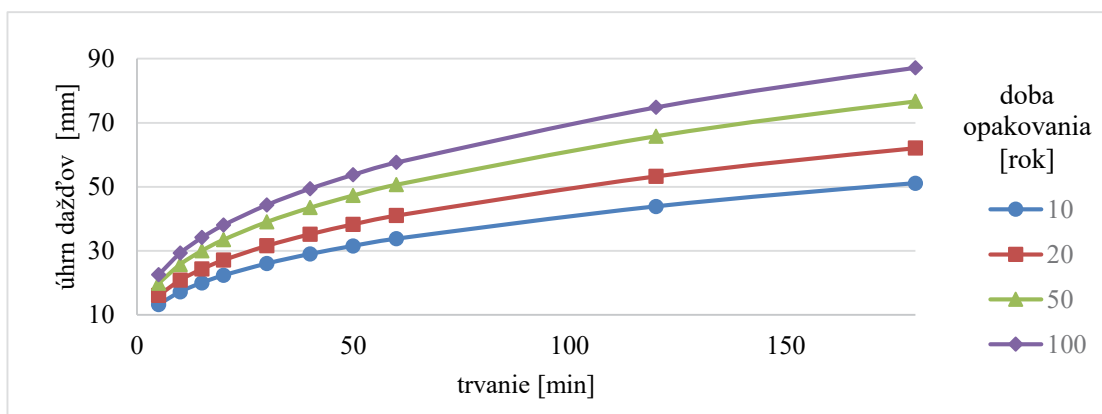
4. Vstupné údaje

Na analýzu vplyvu zmien využitia územia na odtok boli použité návrhové intenzity dažďov pre stanicu Liptovská Teplička (obrázok 2), odvodené z reálnych pozorovaní pre obdobie 1995-2009, ktoré poskytol Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMU). Návrhové intenzity dažďov boli počítané metódou jednoduchého škálovania [12], podľa doby koncentrácie (t_{kc}).



Obrázok 2: Návrhové intenzity dažďov odvodené z reálnych pozorovaní pre klimatologickú stanicu Liptovská Teplička

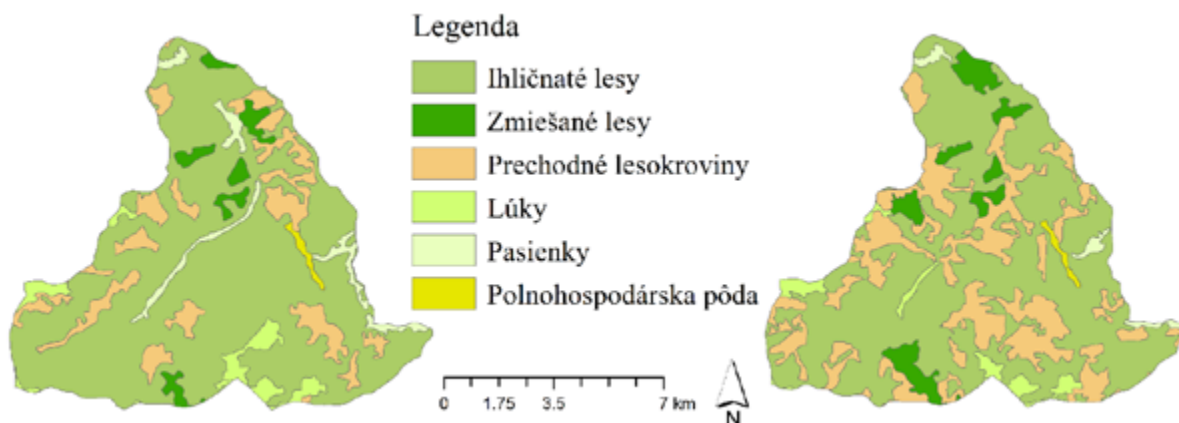
Na analýzu vplyvu klimatických zmien na odtok boli použité návrhové intenzity dažďov zo CLM regionálneho klimatického scenára pre obdobie 2070-2100 pre stanicu Liptovská Teplička (obrázok 3) [8].



Obrázok 3: Návrhové intenzity dažďov pre budúce obdobie pre klimatologickú stanicu Liptovská Teplička

Pre výpočet návrhových kulminačných prietokov boli použité aj nasledovné digitálne mapové podklady:

- rastrová mapa digitálneho modelu reliéfu (DMR), s veľkosťou rastra 20x20 m;
- vektorová mapa pôdnych druhov;
- vektorové mapy využitia územia (Corine Land Cover) [13] pre rok 1990 a 2018 (obrázok 4);
- rastrová mapa v mierke 1 : 25 000 vyhotovená z údajov ZBGIS [14]



Obrázok 4: Spôsob využitia územia pre povodie Ipoltica v roku 1990 a 2018

5. Výpočet a výsledky

5.1 Vplyv využitia územia

Cieľom výpočtu bolo posúdiť vplyv zmeny využitia územia v periode od 1990 do 2018 roku na návrhové kulminačné prietoky (Q_N) pre dobu opakovania 10, 20, 50 a 100 rokov, použitím návrhových intenzít dažďov pre stanicu Liptovská Teplička (obrázok 2), odvodených z reálnych meraní. Hodnoty CN čísiel, ktoré závisia od viacerých hydrologických charakteristík povodia ako sú vlastnosti pôdy, vlastnosti pôdneho krytu, spôsob obrábania pôdy a vlhkosť stav pôdy, boli určené na základe tabuľky CN hodnôt [11, 15]. Výpočet a výsledky návrhových kulminačných prietokov pre rok 1990 a 2018 sú zobrazené v tabuľke 1 a 2.

Tabuľka 1: Výpočet návrhových kulminačných prietokov pre rok 1990 použitím návrhových intenzít dažďov odvodených z reálnych pozorovaní

| Doba opakovania [rok] | Úhrn dažďov [mm] pre trvanie 84.32 min | Vážený priemer CN čísla [-] | Q_N [$m^3 \cdot s^{-1}$] |
|-----------------------|--|-----------------------------|------------------------------|
| 10 | 29.72 | 51.93 | 37.92 |
| 20 | 32.22 | | 44.13 |
| 50 | 35.17 | | 52.01 |
| 100 | 37.15 | | 57.62 |

Tabuľka 2: Výpočet návrhových kulminačných prietokov pre rok 2018 použitím návrhových intenzít dažďov odvodených z reálnych pozorovaní

| Doba opakovania [rok] | Úhrn dažďov [mm] pre trvanie 84.32 min | Vážený priemer CN čísla [-] | Q_N [$m^3 \cdot s^{-1}$] |
|-----------------------|--|-----------------------------|------------------------------|
| 10 | 29.72 | 58.10 | 47.17 |
| 20 | 32.22 | | 54.77 |
| 50 | 35.17 | | 64.38 |
| 100 | 37.15 | | 71.21 |

Z obrázku 4 je vidno že dané územie bolo z veľkej časti odlesnené, presnejšie plocha lesov sa za skúmané obdobie zmenšila o 7.9 ha. Na odlesnenom území sa rozšírili prevažne lesokroviny. Plocha lesokrovín sa v periode 1990-2018 zväčšila o 10.7 ha. Toto odlesnenie malo veľký vplyv aj na výsledky v tabuľkách 2 a 3.

5.2 Vplyv klimatických zmien

Výpočet sa zameriava na posúdenie vplyvu klimatických zmien na návrhové kulminačné prietoky (Q_N) s dobou opakovania 10, 20, 50, 100 rokov. Pre výpočet bola použitá mapa využitia územia z 2018 roku a návrhové intenzity dažďov (obrázok 3) z RCM scenára pre budúce obdobie (2070 – 2100) pre stanicu Liptovská Teplička. S výnimkou návrhových intenzít dažďov, všetky vstupné údaje boli rovnaké ako pre výpočet uvedený v tabuľke 2. Výpočet a výsledky návrhových kulminačných prietokov použitím návrhových intenzít dažďov pre budúce obdobie sú zobrazené v tabuľke 3. Porovnanie výsledkov výpočtu návrhového kulminačného prietoku pre súčasnosť a budúce obdobie, je uvedené v tabuľke 4.

Tabuľka 3: Výpočet návrhových kulminačných prietokov použitím návrhových intenzít dažďov zo scenára pre budúce obdobie

| Doba opakovania [rok] | Úhrn dažďov [mm] pre trvanie 84.32 min | Vážený priemer CN čísla [-] | Q_N [$m^3 \cdot s^{-1}$] |
|-----------------------|--|-----------------------------|------------------------------|
| 10 | 38.40 | 58.10 | 75.64 |
| 20 | 46.63 | | 107.54 |
| 50 | 57.60 | | 156.63 |
| 100 | 65.49 | | 196.02 |

Tabuľka 4: Porovnanie výpočtov návrhových kulminačných prietokov použitím návrhových intenzít dažďov odvodených z reálnych pozorovaní a návrhových intenzít dažďov so scenára pre budúce obdobie

| Doba opakovania [rok] | Q _N [m ³ .s ⁻¹] | |
|-----------------------|---|----------------|
| | súčasnne obdobie | budúce obdobie |
| 10 | 47.17 | 75.64 |
| 20 | 54.77 | 107.54 |
| 50 | 64.38 | 156.63 |
| 100 | 71.21 | 196.02 |

Z výsledkov vyplýva, že klimatické zmeny majú významný vplyv na návrhové kulminačné prietoky. Na základe tabuľky 4 možno skonštatovať, že sa tieto prietoky zvýšili v rozmedzí 60 až 175%.

6. Záver a diskusia

Povodie rieky Ipoltica sa nachádza v pohorí Nízke Tatry, ktoré boli v roku 1978 vyhlásené za Národný Park. Z tohto dôvodu je ťažba v pozorovanom území zakázaná; výnimkou sú veterné a snehové náhodné ťažby, ako aj ťažby stromov ktoré sú zasiahnuté podkôrným a drevokazným hmyzom.

Najvýznamnejšie kalamity, ktoré zasiahli Nízke Tatry boli veterné kalamity Alžbeta v 2004 roku a Kyrill a Filip v 2007 roku. S následkami týchto kalamít sa stretávame dodnes, aj napriek snahe zalesniť toto územie. Odlesnenie územia a zmeny vo využívaní územia ovplyvnili aj návrhové kulminačné prietoky na danom území, ktoré sa zvýšili o 24.4% v prípade doby opakovania 10 rokov, o 24.11% v prípade doby opakovania 20 rokov, o 23.8% v prípade doby opakovania 50 rokov a o 23.6% v prípade doby opakovania 100 rokov.

Druhá časť článku sa sústreďí na vplyv klimatických zmien na návrhové kulminačné prietoky. Klimatické zmeny sú reprezentované údajmi zo CLM regionálneho klimatického scenára pre obdobie 2070-2100. Pre simuláciu bol zvolený semi-pesimistický SRES A1B scenár, ktorý predpokladá zvýšenie globálnej teploty do 2100 roku o 2.9%. Výsledky predpokladajú že sa návrhové kulminačné prietoky zvýšia o 60.4% v prípade doby opakovania 10 rokov, o 96.3% v prípade doby opakovania 20 rokov, o 143.3% v prípade doby opakovania 50 rokov a o 175.3% v prípade doby opakovania 100 rokov.

Z predložených výsledkov vyplýva, že klimatické zmeny sú nielenže aktuálnou celosvetovou témou, ale sú aj výrazným problémom a podstatne ovplyvňujú hodnoty návrhových prietokov. Výpočtom sa ukázalo, že klimatické zmeny majú významnejší vplyv na hodnoty prietokov s väčšiu dobou opakovania na rozdiel od vplyvu zmien využitia územia, ktorý má väčší vplyv na hodnoty prietokov s menšinou dobou opakovania.

PodĎakovanie

Článok vznikol vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja a projektu APVV-18-0347. Autor ďakuje za podporu pri tvorbe tohto príspevku.

Literatúra

- [1] CROZIER, M.J. Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review. *Geomorphology*. 15 December 2010. Vol. 124, no. 3–4, p. 260–267. DOI 10.1016/J.GEOMORPH.2010.04.009
- [2] VALENT, P., RONČÁK, P., MALIARIKOVÁ, M., BEHAN, Š. Utilization of Historical Maps in the Land Use Change Impact Studies: A Case Study from Myjava River Basin. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2016. Vol. 24, no. 4, p. 15–26. DOI 10.1515/sjce-2016-0018.
- [3] MINĐÁŠ, J., ŠKVARENINA, J. *Lesy Slovenska a voda*. 1. Stredoeurópska vysoká škola v Skalici : EFRA Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, 2010. ISBN 978-80-228-2216-9.
- [4] RONČÁK, P., HLAVČOVÁ, K., LÁTKOVÁ, T. Estimation of the Effect of Changes in Forest Associations on Runoff Processes in Basins: Case Study in the Hron and Topľa River Basins. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2016. Vol. 24, no. 3, p. 1–7. DOI <https://doi.org/10.1515/sjce-2016-0011>.
- [5] BAARTMAN, Jantienne E.M., TEMME, Arnaud J.A.M., SCHOORL, Jeroen M., BRAAKHEKKE, Michiel H.A., VELDKAMP, Tom A. Did tillage erosion play a role in millennial scale landscape development? *Earth Surface Processes and Landforms*. 2012. Vol. 37, no. 15, p. 1615–1626. DOI 10.1002/esp.3262.
- [6] GRANGED, A.J.P., JORDÁN, A., ZAVALA, L.M., BÁRCENAS, G. Fire-induced changes in soil water repellency increased fingered flow and runoff rates following the 2004 Huelva wildfire. *Hydrological Processes*. 2011. Vol. 25, no. 10, p. 1614–1629. DOI 10.1002/hyp.7923.
- [7] KUNCA, A., GALKO, J., ZÚBRIK, M. Významné kalamity v lesoch Slovenska za posledných 50 rokov. *Zborník referátov z 23. ročníka medzinárodnej konferencie* [online]. 2014. P. 25–31. DOI: 10.13140/2.1.1121.1849.
- [8] LAPIN, M., BAŠTÁK, I., GERA, M., HRVOJ, J., KREMLER, M., MELO, M. New climate change scenarios for Slovakia based on global and regional general circulation models. *Acta Met. Univ. Comen*. 2012. No. 37, p. 25–74.
- [9] USDA-SCS. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. *National Engineering Handbook, Part 630 - Hydrology*. United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service, Washington DC, 1954. new 2004
- [10] USDA-NRCS. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. *National Engineering Handbook, Part 630 - Hydrology*. United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service, Washington DC, 2004. p. 10-1-10–22.
- [11] USDA-SCS. Engineering Hydrology Training Series. Module 104 - Runoff Curve Number Computations. Study Guide. 2. United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service, Washington DC, 1989.
- [12] FÖLDES, G., KOHNOVÁ, S., LABAT, M.M. Analýza budúcich zmien v charakteristikách krátkodobých dažďov použitím scenára CLM vo vybraných staniach na západnom Slovensku. *Acta Hydrologica Slovaca* [online]. 2019. Vol. 20, no. 1, p. 44–52. DOI 10.31577/ahs-2019-0020.01.0005.
- [13] COPERNICUS LAND MONITORING SERVICE. CORINE Land Cover. *Copernicus Programme* [online]. Dostupné na: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
- [14] ZBGIS®. Úrad geodézie kartografie a katastra Slovenskej republiky. *Mapový klient*
- [15] KARABOVÁ, Beata. Analýza parametrov metódy SCS – CN v podmienkach Slovenska. Slovenská technická univerzita v Bratislave (SvF), 2014.

Ivana Marko¹

Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, 2. ročník

ANALÝZA KVALITATIVNÝCH PARAMETROV DAŽĎOVÉHO ODTOKU Z URBANIZOVANÉHO ÚZEMIA

ANALYSIS OF QUALITATIVE PARAMETERS OF URBAN RAINWATER RUN-OFF

Abstract

The new concept of rainwater management tends to support the sustainable development of urban areas and uses the foundations of blue-green infrastructure. Research focuses on the possibility of applying nature-friendly measures to manage rainwater such as surface and subsurface infiltration. The research aimed to analyze the qualitative parameters of the first rainwater runoff from roads and parking lots from the Slovak Republic and Serbia. In the right part of the research, parameters such as pH, AOX (organically bound halogens), and conductivity were analyzed. For the future is a planned analysis of other parameters such as heavy metals (nickel, aluminum, zinc, copper), COD indicators et. Evaluation of the experiment will be the suitability of using rainwater from roads, design measures, and recommendations.

Kľúčové slová

AOX, dažďový odtok, pH vody, vodivosť

1. Úvod

V súčasnosti zadovážiť pitnú vodu pre obyvateľov v niektorých krajinách sveta je výzvou z hľadiska kvality a množstva. Hlavnou prioritou pre vodohospodárov sú veľké mestá, kde je nevyhnutné uspokojiť rastúci dopyt po pitnej vode. Urýchleným rozvojom urbanizácie a podporov miest budovať umelé krajinné prvky zabraňuje sa prenikaniu atmosférických vôd do pôdneho horizontu čo následne vedie k zníženiu výdatnosti podzemných vodných zdrojov. Na celom svete sa nachádza viac než 500 000 km² spevnených plôch, ktoré nielenže nepodporujú prirodzené vsakovanie dažďovej vody, ale i nepriaznivo vplyvajú na mikroklimu mesta [1]. Pri správnom využití umelé krajinné prvky (cesty, parkoviská, ulice a iné spevnené plochy) môžu poskytnúť alternatívni zdroj vody prostredníctvom systému zberu (vsakovania) dažďovej vody [2]. Zber dažďovej vody je jedna z najlepších dostupných metód na vytvorenie udržateľnosti vodného cyklu v meste. Efektívnym spôsobom hospodárenia s dažďovými vodami by sa mohli znížiť náklady na dopravu a úpravu pitnej vody a odpadovej vody a hlavne regulovať povodne v meste.

Zaužívaný spôsob nakladania s dažďovými vodami v urbanizovanom území bol založený na princípe najrýchlejšieho odvedenie dažďových vôd zo spevnených plôch. Čo sa však časom prejavilo ako nie najvhodnejšie riešenie. Zmenou krajiny a dôsledkom klimatických zmien často dochádza ku zaťaženiu stokového systému a následne k zaplaveniu určitých častí mesta. S cieľom zabezpečiť zníženie rozvoju spevnených plôch sa v súčasnosti mestské úrady snažia o využitie prírode blízkyh opatrení, ktoré podporujú systém efektívneho hospodárenia s dažďovými vodami. Ide komplex opatrení, ktoré by riešili množstvo problémov v mestách týkajúcich sa hlavne zmeny mikroklimy mesta.

¹ Ing. Ivana Marko, STU v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra zdravotného a environmentálneho inžinierstva, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, tel. +421 2 59 274 271 a, e-mail: ivana.marko@stuba.sk

2. Kvalitatívne parametre zrážok

Pri správnom návrhu opatrení a zariadení na hospodárenie s dažďovými vodami dôležité je poznať kvalitatívne parametre povrchového odtoku a množstvo zachytenej dažďovej vody. Charakter znečisťujúcich látok v povrchovom odtoku predovšetkým závisí od znečistenia samotného dažďa, ale i od úhrnu, intenzity a trvania dažďovej udalosti. Chemický zloženie dažďa je podmienené zložením a znečistením ovzdušia v spodnej a strednej časti atmosféry, miestnymi podmienkami a druhom spevnenej plochy (typu strechy, parkoviska, cesty) na ktorú dopadne [3]. Bežne dažďová voda obsahuje prvky ako chloridy, sírany, dusičnany, draslík, vápnik a magnézium v koncentráciách do 10,0 mg.l⁻¹ [3]. priemyselných oblastiach sa jedná o zvýšený podiel oxidu síry, dusíka, amoniaku, stopy solí, prachu, baktérií. Kvalitu dažďového odtoku z nepriepustných plôch podmieňujú i materiály použité na budovanie spevnených plôch, geometria a dĺžka predchádzajúceho bezdažďového obdobia [4]. Za normálnych podmienok sa v povrchovom odtoku nachádzajú ťažké kovy ako sú Cd, Cu, Ni, Pb, Zn v koncentráciách okolo 1,0 mg.l⁻¹. Závislosti od miestnych podmienok sa mení charakter znečisťujúcich látok a tak dažďová voda z povrchového odtoku okrem už spomenutých prvkov môže obsahovať: ropné látky, niektoré toxické látky a organické zlúčeniny. Najznečistenejšia dažďová voda sa vyskytuje v okolí veľkých priemyselných miest a sídel, hlavne v okolí chemického závodu s celkovou mineralizáciou 205,0 mg.l⁻¹ a koncentráciou síranu 108,0 mg.l⁻¹ a najmenej v horských oblastiach [3]. V tabuľke 1. sú uvedené najčastejšie zdroje znečistenia dažďovej vody.

Tab. 1: Zdroje znečistenia dažďovej vody [5]

| Zdroj znečistenia | Znečisťujúce látky |
|--------------------------|---|
| Výfukové plyny | Pb, Ni, zlúčeniny N, fenoly, uhl'ovodíky, PCDD, PCDF |
| Oter brezových obložení | Cr, Ni, Cu, Pb, Zn, častice |
| Oter pneumatík | Cd, Zn, organické zlúčeniny, S, Pb, Cr, Cu, Ni, |
| Oter povrchu komunikácií | Si, Ca, Mg, asfalt, Pb, Cr, Cu, Ni, Z |
| Oter značení komunikácií | TiO ₂ , rozpúšťadlá |
| Únik motorových olejov | Pb, Ni, Zn, organické látky, oleje, tuky, uhl'ovodíky, Cu, Cr |
| Korózia, obrus | Al, Cu, Fe, Co, Mn, Cd, Zn |
| Stavebné hmoty | Minerálne látky, spojivá (asfalt, vápno, cement) |

Chemické zloženie zrážkovej vody výrazne ovplyvňuje prítomnosť kyslých plynov ako: oxid uhličitý, oxid siričitý, oxidy dusíka a amoniakálny dusík, čím voda nadobúda mierne kyslý charakter a dochádza ku zmene hodnoty pH. V oblastiach s neznečistenou atmosférou (horské oblasti) sa hodnota pH zrážkovej vody pohybuje v rozsahu medzi 5,5 do 6,0 v priemyselných oblastiach nadobúda hodnotu cca 3,5 [3]. Z vodohospodárskeho hľadiska pri zrážkových vodách najdôležitejším parametrom je hodnota pH. Hodnota pH zrážkovej vody výrazne ovplyvňuje rozpustnosť a prenos ťažkých kovov z urbanizovaného územia do podzemných vôd a taktiež vplýva na priebeh rozkladu solí prítomných vo vode.

3. Legislatívne predpisy

Celosvetovo existuje celá rada noriem a odporúčaní zastrešujúcich oblasť vodného hospodárstva. Medzi najvýznamnejšie patria odporúčania Agentúry na ochranu životného

prostredia EPA, ktoré podporujú integrovaný systém riešenia nakladania s dažďovými vodami. V rámci Európy je možné vymedziť Rámcovú smernicu o vodách (2000/60/ES), ktorá si vyžaduje ochranu a zlepšenie vodných tokov [6], ako i ďalšie Smernice európskeho parlamentu podotýkajúce oblasť vodného hospodárstva.

Na území Slovenskej republiky hospodárenie z dažďovými vodami v urbanizovanom území zatiaľ nie je podrobne riešené právnymi predpismi a technickými normami. Čiastočne sa touto témou zaoberá Vodný plán Slovenska v súlade s článkom 4.7 písmena d) a Rámcová smernica o vodách (2000/60/ES) [6], ktoré bezvýhradne podporujú opatrenia na budovanie zariadení na zadržiavanie vody v urbanizovanom území a Nariadenie vlády Slovenskej republiky č. 269/2010, ktorým sa ustanovujú požiadavky na dosiahnutie dobrého stavu vôd [7]. Súčasťou obsahu NV v § 9 v bodoch 1–3 sú stanovené požiadavky na vypúšťanie vôd z povrchového odtoku do povrchových a podzemných vôd, ktoré definujú, že v prípade predpokladu obsahu nebezpečných látok v povrchovom odtoku pred nepriamym vypustením, treba vykonať potrebné opatrenia. Nedostatkým slovenských predpisov zastrešujúcich oblasť vodného hospodárstva je stanovenie limitných hodnôt ukazovateľov znečistenia pri vypúšťaní vôd z povrchového odtoku do podzemných a povrchových vôd.

4. Metodika práce

Výber záujmových oblastí za účelom odoberania vzoriek dažďovej vody ovplyvňovalo viacero faktorov. Cieľom výskumu bolo vybrať a porovnať rôzne lokality v urbanizovaných území z katastrálneho územia Slovenskej republiky (Bratislava a Trnava) a Srbskej republiky (Hložany). Jednotlivé vzorky dažďovej vody boli odoberané z cestných komunikácií a parkovísk z dôvodu predpokladu obsahu najväčšieho množstva znečisťujúcich látok. Vo výskume sme sa zamerali na zachytenie prvého splachu dažďovej vody. Na každej odobratej vzorke sa nachádza nálepka s informáciou o mieste zachytenia prvého splachu (GPS koordináty) a času (dátum). Tabuľka 2. obsahuje údaje o mieste a čase odobratia jednotlivých vzoriek dažďovej vody.

Tab. 2: Miesto a čas odberu vzoriek dažďovej vody

| Vzorka | Dátum odobratia vzorky | Miesto | GPS |
|--------|------------------------|--|-----------------|
| 1 | 25.03.2019 | Hlavná cesta - Hložany (Srbsko) | 45.2760/19.5619 |
| 2 | 25.03.2019 | Magistrála Hložany (Srbsko) | 45.2750/19.5627 |
| 3 | 22.04.2019 | Hlavná cesta - Hložany (Srbsko) | 45.2760/19.5619 |
| 4 | 22.04.2019 | Magistrála Hložany (Srbsko) | 45.2750/19.5627 |
| 5 | 22.04.2019 | strecha domu Hložany (Srbsko) | 45.2763/19.5619 |
| 6 | 07.09.2019 | Trnava - Na hlinách - parkovisko | 48.388/71.5959 |
| 7 | 08.09.2019 | Trnava - Na hlinách - parkovisko | 48.388/71.5959 |
| 8 | 01.07.2019 | Krížna ulica - križovatka (BA) | 48.1557/17.1248 |
| 9 | 24.08.2019 | Blumentálska 26- parkovisko (BA) | 48.1554/17.1239 |
| 10 | 24.08.2019 | Krížna ulica (BA) | 48.1554/17.1243 |
| 11 | 06.09.2019 | Krížna ulica (BA) | 48.1554/17.1243 |
| 12 | 09.09.2019 | Krížna ulica (BA) | 48.1554/17.1243 |
| 13 | 09.09.2019 | Maserati parkovisko – Hodonínska 7, Lamač (BA) | 48.2017/17.0133 |
| 14 | 09.09.2019 | STU - Radlinského 11 (BA) | 48.1554/17.1243 |

Ciele výskumu možno rozdeliť do dvoch častí. V prvej časti sa zameriavame na hodnotenie ukazovateľov: reakcia vody = pH, vodivosť dažďovej vody a adsorbovateľné organicky viazané halogény – AOX v zachytených dažďových vodách v jednotlivých oblastiach na Slovensku a Srbsku. Adsorbovateľné organicky viazané halogény – AOX sú prvky 17- tej skupiny periodickej tabuľky prvkov, ako sú: chlór, bróm a jód. Pôvod týchto látok môže byť prírodného (v eutrofizovaných vodách, v riečnych sedimentoch a kaloch) alebo antropogénneho znečistenia. Najčastejšie sa stanovujú pri odpadových vodách [3]. Analýza odobratých vzoriek dažďovej vody prebiehala v laboratóriu Stavebnej fakulty STU v Bratislave na Katedre zdravotného a environmentálneho inžinierstva. Chemická analýza adsorbovateľných organický viazaných halogénov - AOX prebiehala štandardnými metódami na prístroji XPLORED od firmy Trace Elemental Instruments podľa manuálu X PLORED – X DOC0100200. Na meranie hodnoty pH a vodivosti dažďovej vody bol použitý prístroj HQd Field Case od firmy HACH. V druhej časti výskumu bude prebiehať analýza parametrov ako sú ťažké kovy, kadmium a CHSK.

Na hodnotenie nameraných parametrov prvého splachu dažďových vôd zo spevnených plôch odobraných vo vybraných lokalitách na Slovensku a Srbsku sme použili limitné hodnoty na povrchovú vodu podľa Nariadenia vlády Slovenskej republiky č.269/2010, ktorým sa ustanovujú požiadavky na dosiahnutie dobrého stavu vôd. Limitné hodnoty na vyhodnotenie vzoriek pre jednotlivé ukazovatele sú vedené v Tabuľke 3.

Tab.3: Požiadavky na kvalitu povrchovej vody podľa NV SR č.269/2010

| Ukazovatele | Symbol | Jednotka | Limitná hodnota |
|---|--------|-----------------------|-----------------|
| Reakcia vody | pH | - | 6,0 – 9,0 |
| Adsorbovateľné organicky viazané halogény | AOX | $\mu\text{g.l}^{-1}$ | 20,0 |
| Vodivosť | EK | $\mu\text{S.cm}^{-1}$ | 1100,0 |

5. Výsledky a diskusia

Cieľom príspevku bolo analyzovať kvalitatívne parametre prvého splachu dažďovej vody z urbanizovaného územia (parkovísk a cestných komunikácií) pre záujmové lokality a následne porovnanie dosiahnutých výsledkov v daných lokalitách. Tabuľka 4. predstavuje namerané hodnoty pH a vodivosti prvého splachu dažďových vôd z urbanizovaného územia. V tabuľke 5. sú uvedené iba namerané hodnoty adsorbovateľných organicky viazaných halogénov – AOX.

Tab.4: Hodnoty nameraných parametrov prvého splachu

| Vzorka č. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Reakcia vody = pH | 8,3 | 9,1 | 8,3 | 8,2 | 8,1 | 7,7 | 8,1 |
| Vodivosť [$\mu\text{S.cm}^{-1}$] | 197,8 | 144,1 | 180,1 | 201,0 | 24,4 | 179,0 | 107,7 |
| Vzorka č. | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Reakcia vody = pH | 7,7 | 7,1 | 7,1 | 7,6 | 7,7 | 8,6 | 8,9 |
| Vodivosť [$\mu\text{S.cm}^{-1}$] | 212,1 | 133,1 | 124,2 | 135,8 | 178,6 | 86,3 | 92,1 |

Tab. 5: Analýza adsorbiteľných organicky viazaných halogénov - AOX prvého splachu

| Vzorka | Zried'ovací faktor | Pôvodná hodnota | po odčítaní slep. pokusu |
|-----------------|--------------------|----------------------|--------------------------|
| Jednotka | | $\mu\text{g.l}^{-1}$ | |
| Slepák | - | 29,5 | 29,5 |
| 1 | 4,0 | 93,7 | 64,2 |
| 5 | 4,0 | 139,6 | 110,1 |
| 8 | 20,0 | 682,6 | 653,0 |
| 11 | 10,0 | 306,9 | 277,4 |
| 13 | 4,0 | 128,1 | 98,5 |

Na základe nameraných hodnôt možno konštatovať, že pri ukazovateli hodnoty pH podľa odporúčaní NV SR č.269/210 limitné hodnoty boli prekročené iba pri vzorke č. 2, 13 a 14. Pri vyhodnotení vodivosti, namerané hodnoty nepresahovali limitné koncentrácie. V prípade vyhodnotenia adsorbiteľných organicky viazaných halogénov všetky vyhodnocované vzorky dažďovej vody presahovali povolené limitné koncentrácie. Najväčšie množstvo adsorbiteľných organicky viazaných halogénov bolo zistených pri vzorke č. 8, ktorá bola odobratá z križovatke Krížna – Legionárska ulica Bratislava.

6. Záver

Vo výskume sme sa zamerali na zachytenie a analýzu odtoku dažďových vôd z urbanizovaného územia z dôvodu možnosti ich infiltrovania do pôdneho horizontu. Dôvodom zachytenia prvého splachu sú rôzne znečisťujúce látky nachádzajúce sa na spevnených plochách, ktoré po vsiaknutí do pôdy môžu spôsobiť znečistenie podzemnej vody. Odber prvého splachu dažďových vôd prebiehal z cestných komunikácií a parkovísk na území Slovenska – Bratislava a Trnava a na území Srbska – Hložany. Výskumnú prácu možno rozdeliť do dvoch častí. V prvej časti prebiehala analýza ukazovateľov ako sú reakcia vody pH, vodivosť dažďovej vody a adsorbiteľné organicky viazané halogény – AOX. Analýza spomenutých ukazovateľov bola uskutočnená v laboratóriu Stavebnej Fakulty STU v Bratislave na Katedre zdravotného a environmentálneho inžinierstva. V druhej časti výskumu sa zameriame na analýzu ťažkých kovov, CHSK a kadmium. Pre hodnotenie kvality dažďovej vody v druhej časti výskumu budeme porovnávať hodnoty, ktoré boli namerané v jednotlivých lokalitách s limitnými hodnotami, ktoré udáva NV SR č. 269/210, NV SR č.496/2010 a Dánska legislatíva na hodnotenie kvality podzemnej vody.

Cieľom výskumu bolo posúdenie nameraných hodnôt dažďového odtoku v jednotlivých lokalitách na Slovensku a v Srbsku. Následné porovnanie dosiahnutých výsledkov s limitnými hodnotami stanovenými NV SR č. 269/2010, ktorým sa ustanovujú požiadavky na dosiahnutie dobrého stavu vôd.

Na základe uvedených výsledkov možno konštatovať, že nie všetky odbraté vzorky dažďovej vody spĺňali povolené limitné hodnoty. Pri ukazovateli AOX pri všetkých vyhodnocovaných vzorkách boli prekročené limitné koncentrácie s čoho vyplýva, že vsakovanie dažďovej vody z ciest a parkovísk nie je najvhodnejším riešením. Takáto dažďová voda sa považuje za nevhodnú, ktorá by pred infiltráciou do pôdy mala prejsť procesom čistenia.

PodĎakovanie

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. Táto práca bola tiež podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-18-0203, Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVaŠ SR a SAV projekt č. 1/0574/19 a vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

- [1] Angrill S., Petit-Boix A., Morales-Pinzón T., Josa A., Rieradevall J., Gabarrell X.: Urban rainwater runoff quantity and quality – A potential endogenous resource in cities. *Journal of Environmental Management*, year: 15 March 2017, Volume.189, pp.14-21. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479716310064>.
- [2] Fletcher T.D., Deletic A., Mitchell V.G., Reuse of urban runoff in Australia: a review of recent advances and remaining challenges. *Journal of Environmental Quality*, year: 3 August 2007, Volume.37, No.5, pp.116-127. https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/37/5_Supplement/S-116
- [3] PITTERM P.: *Hydrochemie 4. aktualizované vydanie*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2009. 592 s. ISBN 978-80-780-701-9
- [4] Nosrati, K., 2017. *Identification of a water quality indicator for urban roof runoff*. Sustainability of Water Quality and Ecology 9–10, 78-87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.swaqe.2017.07.001>
- [5] HLAVÍNEK, P. – MIČÍN J. a kol. 2006. *Stokování a čištění odpadních vod* Brno: VÚT v Brne, 2006, 132 s.
- [6] Smernica 2000/60/ES Európskeho parlamentu a Rady z 23. októbra 2000, ktorou sa stanovuje rámec pôsobnosti pre opatrenia spoločenstva v oblasti vodného hospodárstva.
- [7] Nariadenie vlády Slovenskej Republiky č. 269/2010 Z. z., ktorým sa ustanovujú požiadavky na dosiahnutie dobrého stavu vôd.

Michal Marton¹

Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, ročník: 2

ADSORPCIA MIKROPOLUTANTOV NA GRANULOVANOM AKTÍVNOM UHLÍ

ADSORPTION OF MICROPOLLUTANTS ON GRANULAR ACTIVATED CARBON

Abstract

One of the main targets of research in these days are micropollutants, because they are widely spread in our environment. It is necessary to remove them from the environment such as soil, atmosphere and the water. Many drinking water supplies are contaminated by their presence and therefore they need to be removed before safe using by customers. These micropollutants can be removed from water by various processes such as coagulation, filtration, membrane processes and of course adsorption. One of the most used adsorbents in the world is activated carbon (AC). AC is one of the best adsorbents because of his high adsorption capacity and possibility to be regenerated. We focused our attention to granular activated carbon (GAC), which is the most used AC in the water treatment.

Kľúčové slová

Pesticídy, Mikropolutanty, Granulované aktívne uhlie, Adsorpcia, Chromatografia.

1. Úvod

Mikropolutanty môžu byť klasifikované v rôznych skupinách ako sú brómované spomaľovače horenia, chlórované parafíny, pesticídy, organofluórové zlúčeniny, produkty dennej hygieny, farmaceutiká, antibiotiká a drogy. Infiltrácia týchto mikropolutantov do zdrojov podzemných vôd môže spôsobiť vážne problémy pre živé organizmy vrátane ľudí. Na ich odstraňovanie sa preto používajú rôzne procesy ako sú adsorpcia na adsorpčnom materiáli, napríklad aktívne uhlie, pokročilé oxidačné procesy ako ozonizácia alebo membránové procesy. [1]

Pesticídy sú jedny z najpoužívanejších látok v poľnohospodárstve, ktoré sa používajú proti škodcom delených do rôznych skupín ako sú buriny, hmyz, hlodavce, huby a ďalšie. Pesticídy sú zmesou látok, ktoré sú namiešané pre ich najlepší účinok proti špecifickým škodcom. Je to zmes aktívnej látky a prídavných látok, ktoré zabezpečujú jej zvýšený účinok. Pod pojmom aktívna zložka rozumieme látku, ktorá je špecificky zameraná na ničenie konkrétneho škodcu. Tieto prídavné látky nazývame inertné zložky, ale tie sú niekedy viac toxickéjšie ako samotná aktívna zložka. Preto patria pesticídy medzi látky, ktoré predstavujú nebezpečenstvo pre živé organizmy a ľudí. Zloženie pesticídnej látky často neobsahuje podrobné zloženie a to kvôli ochrane výrobného tajomstva. Tieto aktívne aj inertné látky môžu spôsobovať rôzne kožné, dýchacie, nervové a imunitné problémy ako aj čiastočné až úplné zlyhanie orgánov v závislosti od vystavenia koncentrácie toxickéj látky. [2]

Neopracovaná forma grafitu (uhlia), ktorá sa používa ako adsorpčný materiál sa nazýva Aktívne uhlie. Ale od uhlia sa líši svojou pórovitou štruktúrou. Je to veľmi dobrý sorpčný materiál, ktorý je neselektívny a teda dokáže na seba viazať široké spektrum zlúčenín. Jeho pórovitá štruktúra je

¹ Ing. Michal Marton, Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta, Katedra zdravotného a environmentálneho inžinierstva, Radlinského 11, 810 05, Bratislava

tvorená trhlinami, puklinami, škárami a pórmí. Vďaka jeho grafitovému atómovému usporiadaniu má tento materiál veľkú adsorpčnú plochu. Veľkosť plochy môže dosahovať až 1000 m²/g, čo si možno predstaviť, že 3 g aktívneho uhlia majú veľkosť aktívnej plochy rovnú ploche futbalového ihriska. Aktívne uhlie môže byť vyrobené z rôzneho materiálu, kde sa podľa spôsobu výroby líšia jeho vlastnosti a schopnosť adsorpcie. Medzi najpoužívanejšie materiály na výrobu aktívneho uhlia sa používajú kokosové škrupiny, uhlie a drevo. Ďalším veľmi dôležitým parametrom pri výbere a aplikácii aktívneho uhlia je jeho forma. Aktívne uhlie má tri základné formy a to práškové, granulované a extrudované uhlie [3].

Granulované aktívne uhlie (GAC) má veľkosti častíc v rozmedzí od 0,2 do 5 mm. Sú to nepravidelne tvarované častice vytvorené mletím a preosievaním. Táto forma uhlia sa používa na adsorpciu kvapalín aj plynov. Výhodou tejto formy je jeho možnosť regenerácie, ktorá prebieha najčastejšie pri vysokej teplote. Pri tomto procese sa z pórov aktívneho uhlia uvoľňujú naviazané látky. Granulované aktívne uhlie sa najčastejšie používa pri odstraňovaní konkrétnej skupiny polutantov z pitnej alebo aj odpadovej vody. [4].

2. Materiál a Metódy

Pesticídy ako jedny z hlavných mikropolutantov spolu s farmaceutikami a drogami sa väčšinou z vôd odstraňujú pomocou aktívneho uhlia. Používajú sa rôzne formy aktívneho uhlia pre rôzne typy vôd. Najčastejšie sa používa granulované aktívne uhlie, ktoré je schopné dostatočne naviazať a odstrániť mikropolutanty z vody. Práškové aktívne uhlie sa používa skôr pre analytické stanovenie alebo pri laboratórnych pokusoch. Na stanovenie týchto látok, medzi ktoré patria aj spomínané pesticídy, sa používa najčastejšie chromatografická metóda. Využíva sa kvapalinová aj plynová chromatografia, kde sa využívajú rôzne detektory. Medzi najpoužívanejší detektor patrí hmotnostný spektrometer [5].

Autori Sjerps R.M.A et al. zisťovali množstvo a výskyt pesticídov vo vode metódou LC-MC/MS. Experimenty prebiehali v objeme 45 mL vzorky vody, kde sa pridala koncentrácia štandardov pesticídov 0,5 mg/L o objeme 50 µL. Táto vzorka sa potom stanovovala kvapalinovou chromatografiou UHPLC, s použitím kolóny Hypersil GOLD C18. Používali dve mobilné fázy a to kyselinu octovú vo vode a kyselinu octovú v acetonitrile. Teplota kolóny bola 25°C a prietok 300 µL/min. Následne sa pesticídy stanovovali na hmotnostnom spektrometri pri teplotách 275 a 350°C, s prietokom pomocného plynu 10 L/min. Reálne vzorky vody sa stanovovali rovnakým spôsobom. Ich experimenty a prieskum ukázali prítomnosť pesticídov vo vodách a to až 15 z 24 sledovaných pesticídov. V niektorých prípadoch šlo dokonca aj o koncentrácie väčšie ako sú povolené limity [6].

Experimenty zamerané na adsorpciu aktívnym uhlím patria medzi základné pri úprave vody. Pri použití rôznych výšok filtračného materiálu GAC, 5 až 15 cm, v kolóne s prietokom 4 m/h sa adsorbovali herbicídy. Pri tomto experimente sa posudzovala ako účinnosť výšky filtračného materiálu, v tomto prípade granulovaného aktívneho uhlia, tak aj účinnosť odstránenia znečistenia v jednotkách TOC. S narastajúcou výškou filtračného valca sa zvyšovala aj účinnosť odstránenia TOC, ktorá v istom bode procesu dosiahla takmer kontinuálne hodnoty. Tieto experimenty sa sledovali v časovom odstupe niekoľko dní. Pri použití 15 cm výšky GAC v kolóne sa dosiahlo takmer 60% odstránenie TOC, čo v porovnaní s 5 cm lôžkom bolo len okolo 20%. Skúmaná bola aj rýchlosť filtrácie pri rôznych prietokoch výškou filtračného materiálu 5 cm. So zvyšujúcou sa rýchlosťou filtrácie sa znižovala účinnosť [7].

S.-W. Nam et al., používali práškové aktívne uhlie na odstraňovanie mikropolutantov a vzorky po adsorpcii stanovovali kvapalinovou chromatografiou. Experimenty boli uskutočňované na vzorkách povrchovej vody, kde boli koncentrácie mikropolutantov upravované na koncentráciu 100 ng/L. Jednotlivé experimenty boli zamerané na adsorpciu pri rôznej dávke práškového aktívneho uhlia. Sledovali sa účinnosti pri dávkach 1, 5 a 20 mg aktívneho uhlia pri miešaní 70 ot/min a času miešania 4 h v banke zabalenej do alobalu, čo zabránilo priebehu fotolýzy. Filtrovaná voda použitá vo všetkých testoch bola koncentrovaná extrakciou v tuhej fáze a potom analyzovaná pomocou LC MS/MS. V tomto experimente bol taktiež študovaný vplyv pH (5, 7, 9 a 12) na účinnosť reakcie. Zistilo sa, že pri vyšších dávkach aktívneho uhlia a dlhšom čase reakcie sa zvyšovala účinnosť reakcie. Pri použití dávky vyššej ako 5 mg/L sa dosahovali účinnosti od 69 do 84% v závislosti od stanovovaného mikropolutantu. V prípade sledovania pH na účinnosť sa zistilo, že pri hodnote pH 7 sa dosahovali najlepšie výsledky, od 45 do 80%. [8]

Matsushita T. et al. skúmali odstraňovanie pesticídov z pitnej vody použitím práškového aktívneho uhlia (PAC). Objem vzorky 500 ml bol odoberaný z úpravne pitnej, prefiltrovaný cez membránový filter 0,45- μ m a kvantitatívne prenesený do banky s objemom 1 L. Následne sa upravilo pH vzorky s HCl tak aby po adsorpcii bolo 7. do roztoku bolo pridaných 10 mg PAC a vzorka bola miešaná lopatkovým miešadlom 1 hodinu. Z banky boli odoberané vzorky v časových intervaloch 10 až 20 min, ktoré sa následne filtrovali na membránovom filtri s veľkosťami pórov 0,45- μ m kvôli odstráneniu zvyškového PAC. Následne sa vzorky stanovovali na LC/MS a GC/MS prístrojoch na zistenie výslednej koncentrácie pesticídov. Účinnosť daného aktívneho uhlia sa pohybovala v závislosti od pesticídu a to v priemere od 50 do vyše 80% [9].

3. Výsledky a Diskusia

Ako vyplýva z uvedených výskumov, najčastejšie sa na adsorpciu používa aktívne uhlie. Medzi ďalšie známe adsorpčné materiály patria napríklad zeolity, ílovité materiály, GEH alebo aj aktivovaný hliník. Tieto ale nemajú také výhodné sorpčné vlastnosti ako aktívne uhlie. Preto je väčšina výskumov zameraná na použitie práškového aktívneho uhlia, ale z ekonomického hľadiska je oveľa praktickejšie použitie granulovaného uhlia. Nevýhody práškového aktívneho uhlia spočívajú v jeho nemožnosti regenerácie, ťažšom odstraňovaní kvôli veľkosti častíc a obťažnejšiemu čistení technologickej linky. Preto sme aj z tohto dôvodu rozhodnutí použiť granulované aktívne uhlie. To sa v praxi bežnejšie používa, najmä v úpravniach vody. Podľa jednotlivých výskumov budeme aj my podobne sledovať rôzne dávky aktívneho uhlia a sledovať zmeny účinnosti. Uskutočňované budú ako statické tak prietokové laboratórne experimenty, kde sa bude dávkovať zmes pesticídov. Tieto pesticídy sa vyberú podľa ich najčastejšieho výskytu a použitia. Predpokladom je ich výskyt v prírode a v povrchovej či podzemnej vode. Jednotlivé vzorky vody budú najprv laboratórne namiešané a po vykonaní tejto série experimentov chceme merať aj reálne vzorky vody. Stanovenie koncentrácií jednotlivých pesticídov by sme chceli merať pomocou plynovej chromatografie a hmotnostnej spektrometrie, ale taktiež na kontrolu a porovnanie overiť vzorky v akreditovanom laboratóriu buď plynovou alebo aj kvapalinovou chromatografiou. Momentálne tieto experimenty prebiehajú, kde sme si vybrali určitú skupinu pesticídov, ktoré sme pridali do modelovej vzorky vody. V tejto vzorke to budeme následne adsorbovať na granulované aktívne uhlie. Odobrané vzorky vody nám zmeria na kvapalinovom chromatografe firma, ktorá nám dodala štandardy pesticídov.

4. Závery

Aktívne uhlie patrí medzi najpoužívanejšie a najlepšie sorpčné materiály, a ako ukazuje výskum tak sa bežne používa nielen v laboratórnych modeloch ale aj v praxi, napríklad pri úprave pitnej vody. Najčastejšie používané je granulované aktívne uhlie, vďaka vyhovujúcim parametrom a dobrej

regeneračnej kapacity. My budeme tento fakt využívať pri odstraňovaní pesticídov z vôd práve využitím granulovaného aktívneho uhlia a budeme zisťovať najvhodnejšie dávkovanie a čas reakcie. Stanovenie bude uskutočňované ako vlastným stanovením na GC-MS prístroji tak aj stanovením koncentrácií prostredníctvom externého laboratória., ktoré nám zabezpečilo štandardy jednotlivých pesticídov.

PodĎakovanie

Článok bol pripravený za podpory projektu APVV-15-0379 na financovanie jednotlivých stanovení a meraní pesticídov.

Článok vznikol vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

- [1] RODRÍGUEZ-CHUECA J., Laski E., García-Canibano C., Martín de Vidales M.J., Encinas Á., Kuch B., Marugán J. (2018). Micropollutants removal by full-scale UV-C/sulfate radical based Advanced Oxidation Processes. *Science of the Total Environment* 630, p.1216-1225.
- [2] ROSENFELD P.E., Feng L.G.H. (2011). *Risk of Hazardous Wastes*. Elsevier Inc., USA
- Sjerps R.M.A., Kooji P.J.F., Loon A., Van Wezel A.P. (2019), Occurrence of pesticides in Dutch drinking water sources. *Chemosphere* 234, p. 510-518.
- [3] MARSH H., Rodríguez-Reinoso F. (2006). *Activated Carbon*. Elsevier Science & Technology Books
- [4] EDZWALD J.K. et al. (2011) *Water Quality & Treatment: A Handbook of drinking Water*, Sixth Edition. American Water Works Association. USA, ISBN 978-0-07-163011-5
- [5] RODRIGUEZ-NARVAEZ O.M., Peralta-Hernandez J.M, Goonetilleke A. (2017). Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review. *Chemical Engineering Journal* 323, p. 361-380.
- [6] SJERPS R.M.A., Kooji P.J.F., Loon A., Van Wezel A.P. (2019), Occurrence of pesticides in Dutch drinking water sources. *Chemosphere* 234, p. 510-518.
- [7] AREERACHAKUL N., Vigneswaran S., Ngo H.H., Kandasamy J., (2007), Granular activated carbon (GAC) adsorption photocatalysis hybrid system in the removal of herbicide from water. *Separation and Purification Technology* 55, p. 206-211.
- [8] NAM S.-W., Choi D.-J., Kim S.-K., Her N., Zoh K.-D., (2014), Adsorption characteristics of selected hydrophilic and hydrophobic micropollutants in water using activated carbon, *Journal of Hazardous Materials* 270, p. 144-152.
- [9] MATSUSHITA T., Morimoto A., Kuriyama T., Matsumoto E., Matsui Y., Shirasaki N., Kondo T., Takanashi H., Kameya T. (2018), Removals of pesticides and pesticide transformation products during drinking water treatment process and their impact on mutagen formation potential after chlorination. *Water Research* 138, p. 67-76.

Zinaw Dingetu Shenga¹
Water Resources Engineering, 4th year

MODELLING GROUNDWATER FLOW WITH SURFACE WATER INTERACTION

Abstract

The interaction between groundwater and surface water is mostly simulated in regional groundwater models and more attention should be given to riverbed conductance. Riverbed conductance can be estimated from hydraulic properties of riverbed sediments and head losses between the river and the adjacent aquifer. Simulation of surface water and groundwater interaction requires reliable computer code that dynamically integrate both groundwater and river fluxes. In this study, a MODFLOW-2005, which contains several extended flow packages was used to simulate Danube River and groundwater interaction for both steady and transient state. The conductance of the riverbed and hydraulic conductivity of the aquifer were adjusted during calibration for the steady state condition and the results were satisfying.

Keywords

Groundwater head, MODFLOW-2005, riverbed conductance, river Stage

1. Introduction

Groundwater is often developed as a result of infiltration of precipitation, snowmelt or underlying rock as well due to leakage from stream. There is a continuous dynamic interaction between the groundwater and surface water. The process of this interaction is mostly very complex to solve. The seepage between the river and the adjacent aquifer system occurs along their entire intersection and it depends on the river stage, hydraulic head in the groundwater system and the riverbed conductance. For the past few decades, some surface models (e.g. HBV, SWAT, etc.) are used to simulate surface water runoff process that simplify the interaction with the groundwater. MODFLOW, FEFLOW, GMS, etc., deals with groundwater modelling by indiscriminately simplifying the surface processes.

Groundwater-surface water interaction requires reliable computer code that dynamically integrate groundwater, unsaturated zone and river fluxes. MODFLOW-2005 or MODFLOW-NWT model [1] which contains several extended flow packages (for e.g., River Flow package (RIV), Stream Flow Routing package (SFR), Horizontal Flow Barrier package (HFB) or Unsaturated Zone Flow package (UYF), etc.), is among the dynamic computer code used for simulation of groundwater-surface water interactions. For this study, Danube River-groundwater interaction is simulated by creating steady state and transient state model using MODFLOW-2005 under ModelMuse environment by taking into account River package (RIV). MODFLOW-2005 is an open source computer code that solves simultaneous finite-difference equations of groundwater flow [1].

¹ Ing. Zinaw Dingetu Shenga, STU in Bratislava, Faculty of Civil Engineering, Radlinského 11, 81005 Bratislava

2. Data and Methods

2.1 Data collection

In order to construct a numerical 3D groundwater flow model with MODFLOW-2005, several input data have been gathered and analysed. A digital elevation model (DEM) of 50x50 pixel size was created by help of ArcMap based on elevation data obtained from State Geological Institute of Dionýz Štúr. The adjacent terrain to the Danube River in the section from Devin to Harbour Bridge (Prístavný most) can be considered as plane. The change in elevation from the upstream to the downstream in this section is almost negligible.

The weekly precipitation data at Bratislava-airport and Bratislava-Koliba is obtained from Slovak Hydrometeorological Institute (SHMI) [2] for estimation of a recharge rate over the model area. The estimated rate was applied to the active top layer of the model. Data about, discharge and water stage in Danube River were obtained from Slovak Hydrometeorological Institute as shown in *Fig.1* [3]). below. It can be seen from the graph that observed discharge in 2013 was more than 10 000 m³.s⁻¹. However, the mean daily discharge at Bratislava gauge is about 2 057 m³.s⁻¹. The corresponding water level for the specified year was about 138. 77 m above sea level (m a.s.l.) [4], the water stage was increased by more than 6 m as compared to the annual mean stage .

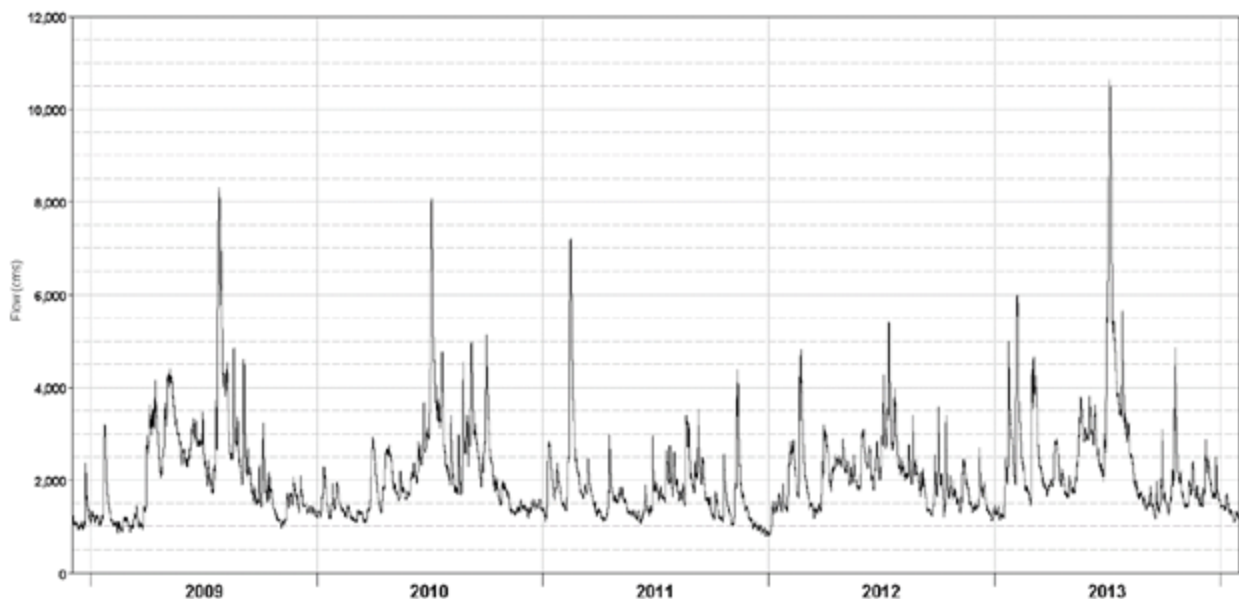


Fig. 1: Hourly Discharge in Danube River at Bratislava gauge in m³.s⁻¹ for the year 2009 to 2013
[Source: SHMI]

The other important input parameter for groundwater modelling is data about hydrogeology of the aquifer system. Hydraulic conductivity of the aquifer was obtained from State Geological Institute of Dionýz Štúr and the value varies between 10⁻⁴ to 2x10⁻² m.s⁻¹ [5]. However, the obtained parameter was adjusted during calibration. Groundwater pumping from the municipal wells have been also considered in this model to account for stress due to groundwater withdrawal.

2.2 Methods

A steady state and a transient state groundwater model were created using MODFLOW- 2005 with application of ModelMuse software environment which contains different packages, including River Package. ModelMuse is a free source graphical user interface (GUI) for the U.S. Geological Survey (USGS) to execute both MODFLOW-2005 and PHAST. It is a pre-processing software, which implements most features of MODFLOW [1]. ModelMuse has a high performance due to the “design by objects” concept that optimizes the conceptualization of boundary conditions and other hydraulic parameters, reducing model construction time and improves output data interpretation. As the spatial data is independent of the grid and the non-spatial data is independent of the time stress, the user can redefine the discretization without any restraint. The MODFLOW-2005 has full capacity to solve a three-dimensional groundwater flow equation through porous material. The program simulates steady and unsteady flow in an irregular shaped flow system, where the aquifers can be confined, unconfined or combination of both. It uses finite difference approximation for derivation of head with respect to time.

Conceptual model is developed based on physical, hydrological, geological and hydrogeological data, which are obtained from different companies and institutes. The basic graphical representation of the complex natural aquifer was adjusted before developing the numerical model. The developed conceptual model will be used to compile detailed information about geological formation, groundwater flow directions, hydrologic boundaries (i.e., rivers, streams, recharge, etc.), hydrogeological parameters (i.e., hydraulic conductivity, river bed conductance, storage coefficient, etc.), extraction from well networks and observation of groundwater heads [6]. Specifically, proper characterisation of the hydrogeological conditions of the area will be used to describe the relevant flow system [6]. This will be to select an appropriate model or to develop a reliably calibrated model. The created conceptual model is the most basic step for developing the numerical model and it will help to reduce the effort we apply to calibrate the model [6].

The first step in developing the numerical model is to generate the finite-different mesh that fills the model domain with elements. The created grid is consistent with S-JTSK Slovak coordinate system and a rectangular cell size of 80 metres by 80 metres were used. The overall model grid was designed with 80 rows and 74 columns, creating total cells which are equal to 5920.

For this study, a general head boundaries (GHB) or no-flow boundaries are used for the assigned model layers [7]. The boundaries are assigned based on topography as well as subsurface hydrogeological conditions. The no-flow boundaries are assigned based on geology and topographic divides. However, the general head boundaries are assigned across the boundaries where groundwater flows in or out across the boundaries. This will help to account for the groundwater inflow and outflow from the system.

Danube River, on the other hand, is used as an internal boundary condition using River package. The River package which is integrated to MODFLOW-2005, is used to compute the flow into or out of the groundwater system as a function of the head. The head can rise or fall due to the interaction between the groundwater and the River. The seepage between the river and the adjacent aquifer system occurs along their entire intersection and it depends on the river stage, hydraulic head in the groundwater system and the riverbed conductance. This boundary condition is called Type 3 or Cauchy boundary condition. With Cauchy boundary condition, the river flux q is computed as follows [8]:

$$q = K \frac{h_1 - h_a}{L} \quad (1)$$

where q is the river exchange flux [LT^{-1}],
 K is the hydraulic conductivity of riverbed sediment [LT^{-1}],
 h_1 is the water stage on the river [L],
 h_a is the aquifer head [L],
 L the distance between the points at which h_1 and h_a are measured [L].

However, the volumetric flux can be expressed as:

$$Q = q \cdot A = \frac{KA}{L}(h_1 - h_a) = C(h_1 - h_a) \quad (2)$$

where $C = \frac{KA}{L}$ is the conductance [L^2T^{-1}],
 A is the area of the boundary [L^2].

For this study, the riverbed sediment thickness and its hydraulic conductivity were assumed to set the initial boundary conditions.

3. Discussion

It is obvious that interaction between surface water and groundwater occurs along the intersection between the river and adjacent aquifer. Aquifer can be recharged or drained to the river based on the position of groundwater head with respect to the river stage and based on climate and seasonal conditions.

The steady state simulation for the model was calibrated manually in order to fit the simulated and the observed groundwater head. The observed groundwater head, yearly average water stage and discharge in Danube River were considered for calibration purposes. However, for proper simulation of interaction between surface water and groundwater flow, the conductance of the riverbed sediment is the main parameter to be calibrated. Given that there is no available data about riverbed at hand, a simple mathematical approach was used to assume the initial value of river conductance based on the equation (2) above. The adjusted conductance of the riverbed sediment was $0.115 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. For the calibrated conductance value, the percent discrepancy was about 0.04 %.

The calibration mainly focused on horizontal hydraulic conductivity and riverbed sediment conductance. During calibration, the horizontal conductivities obtained from State Geological Institute of Dionýz Štúr were reduced by about 15% and the resulting difference between simulated and observed groundwater head was within a range of $\pm 0.65 \text{ m}$ as shown in *Fig. 2*.

The transient simulation was carried out to check the influence of the water level in Danube River. For this purpose, the flood wave which was recorded in 2013 was used. During this flood wave, the water level in the Danube River was increased by about 10.43 m as mentioned in [4]. The simulation was run for daily time step. When the water stage increased in the river, the water level in the vicinity of the river dramatically increased *Fig. 3*. However, no specific calibration was conducted here.

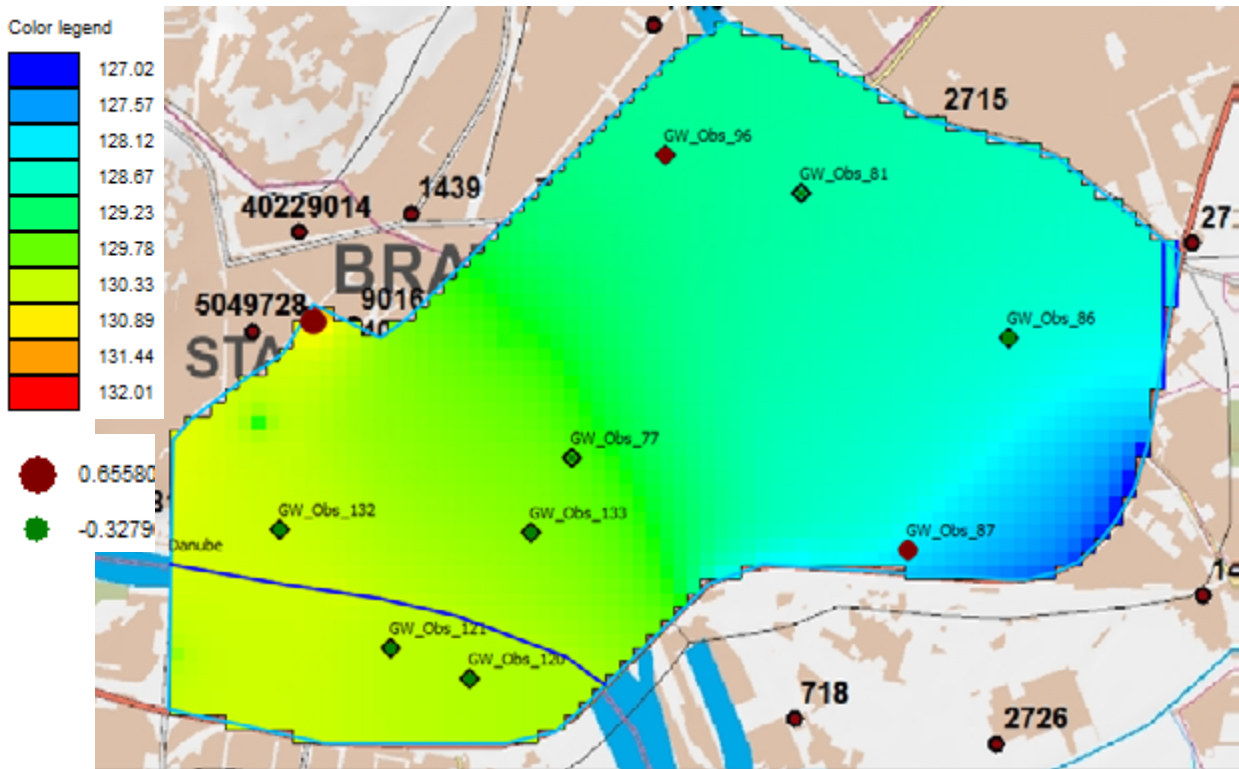


Fig. 2: Simulated groundwater head for steady state condition and residual [m a.s.l.]

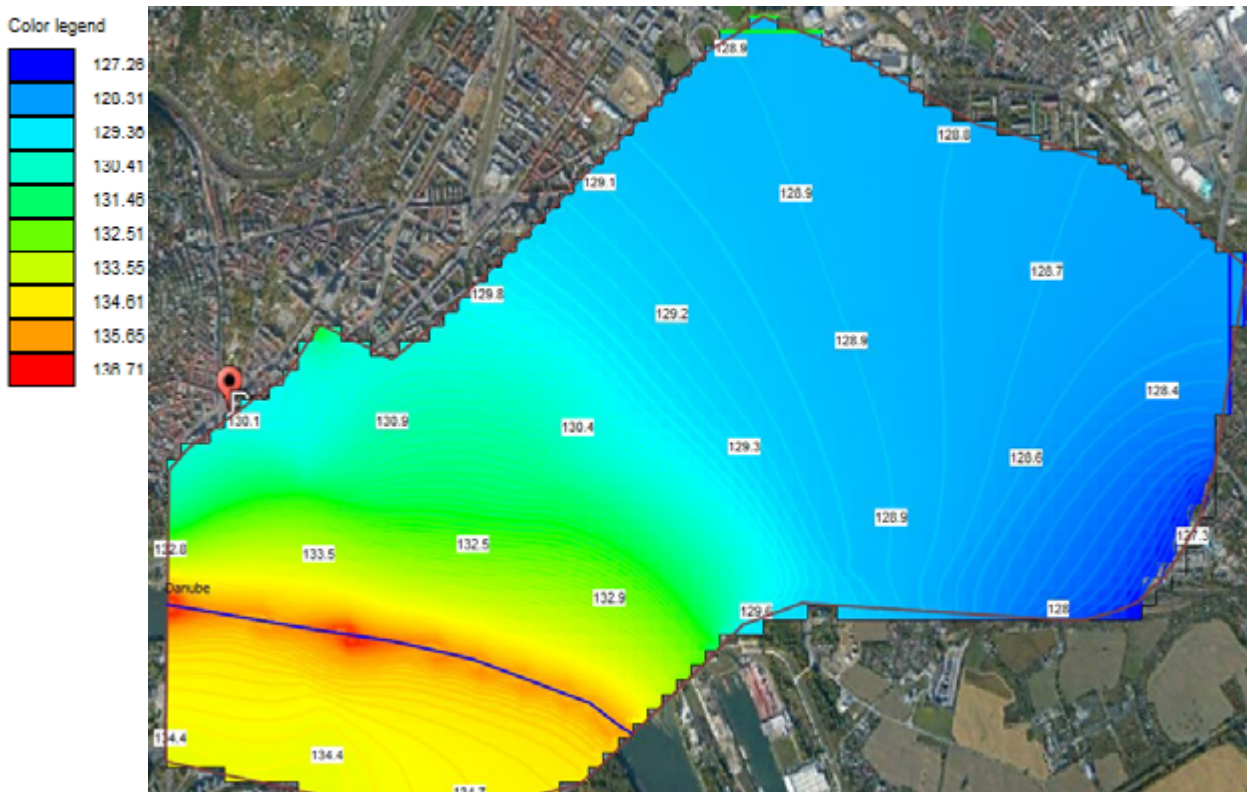


Fig. 3: Simulated groundwater head for increased water level in Danube to 138 [m a.s.l.]

4. Conclusion

In order to achieve the main goal of this study, steady state and transient state of 3D groundwater model was created and some parameters were calibrated manually. The calibration process mainly focused on horizontal hydraulic conductivity of the aquifer and the conductance of the riverbed sediments. In the steady state simulation, the simulated groundwater head matched the observed groundwater head with acceptable difference (± 0.65 m). However, it will be necessary to carry out another research to investigate the influence of riverbed conductance on the relationship between surface water and groundwater during peak flow in the Danube River. But it is seen from the model that the influence of river stage fluctuation on groundwater heads found to be dependent on the distance from the river.

Acknowledgement

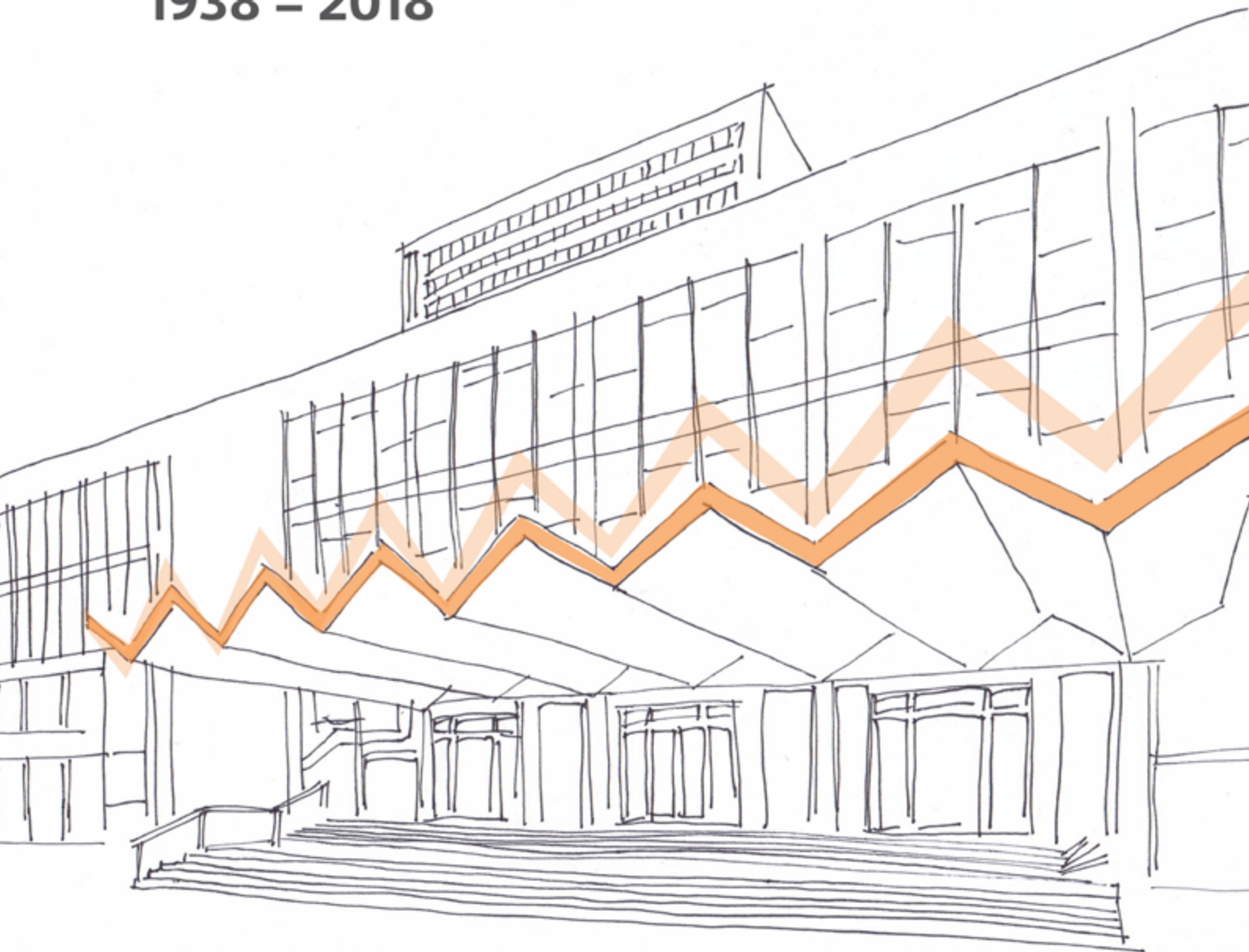
The study was also supported by the grant of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic under KEGA Grant 053STU-4/2017.

References

- [1] Harbaugh, A. W.: MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - the Ground-Water Flow process, 2005. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16/PDF.htm>.
- [2] Slovak Hydrometeorological Institute, *Observed Groundwater Head in SHMI Boreholes*.
- [3] Slovak Hydrometeorological Institute, *Hourly Discharge in Danube River at Bratislava gauge*.
- [4] Pekárová, P., Halmová, D., Mitková, V. B., Miklánek, P. Pekár, J. and Škoda, P., Historic flood marks and flood frequency analysis of the Danube River at Bratislava, Slovakia,. In: *Journal of Hydromechanics*, vol. 61, no. 4, pp. 326-333, 2013.
- [5] MICHALKO, J.; KORDIK; J. AND BODIS, D.: Identification and management of strategic groundwater bodies for emergency situations in Bratislava District, Slovak Republic. *Journal of Hydrogeology-International Association of Hydrogeologists*. 2014, Vol. 19, pp 165-178.
- [6] HESCH, W.: Conceptual model development for MODFLOW or FEFLOW models. *FEFLOW Conference*, 2009, pp. 38.
- [7] Reilly, T.E. System and Boundary Conceptualization in Ground-Water Flow Simulation, U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR, U.S. GEOLOGICAL SURVEY, Denver, 2001.
- [8] Garabin, "Modeling groundwater with ocean and river interaction," *WATER RESOURCES RESEARCH*, vol. 35, no. 8, pp. 2347-2358, 1999.

R&KOV

1938 – 2018



ISBN 978-80-227-4972-5

www.svf.stuba.sk