STU SvF

SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN BRATISLAVA
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering

35th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, 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

November 5th 2025, Bratislava, Slovakia

SPEKTRUM STU

© Slovak University of Technology in Bratislava,
Faculty of Civil Engineering, 2025

Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave
vo Vydavateľstve SPEKTRUM STU, Mýtna 30, 811 07 Bratislava v roku 2025

Zostavila a graficky upravila Zuzana Haššová
Na titulnej strane študenti fakulty, foto Martin Haburaj

Publikácia neprešla korektúrou.

Prvé vydanie
485 strán

ISBN 978-80-227-5555-9

www.svf.stuba.sk

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 2025 was the thirty-fifth 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. Andrej Bartók, PhD.
prof. Ing. Juraj Bilčík, PhD.
Ing. Ján Brodniansky, PhD.
Ing. Jakub Čurpek, PhD.
doc. Ing. Michaela Danáčová, PhD.
Ing. Matúš Ďubek
Ing. Michal Franek, PhD.
doc. Ing. Marek Fraštia, PhD.
prof. Ing. Katarína Gajdošová, PhD.
Ing. Jakub Gašpárek, PhD.
Ing. Robert Geisse, PhD.
doc. Ing. Alena Golian - Struhárová, PhD.
prof. Ing. Jaroslav Halvonik, PhD.
Ing. Peter Hanuliak, PhD.
Ing. Roman Herda, PhD.
Ing. Richard Honti, PhD.
Ing. Jaroslav Hrudka, PhD.
doc. Ing. Ľuboš Hruštinec, PhD.
Ing. Ján Iľko, PhD.
doc. Ing. Rastislav Ingeli, PhD.
prof. Ing. Norbert Jendželovský, PhD.
Mgr. Juraj Kalafut
prof. Ing. Silvia Kohnová, PhD.
Ing. Ľudmila Kormošová, PhD.
prof. RNDr. Mária Kozová, CSc.
Ing. Martin Kubáň, PhD.
Ing. Eliška Kučová, PhD.
Ing. Katarína Lamperová, PhD.
doc. Ing. Marek Macák, PhD.
doc. Ing. Marián Marčiš, PhD.
Mgr. arch. Ing. Nora Naddourová, PhD.
doc. Ing. Martin Orfánus, PhD.
Ing. Adela Palková, PhD.
doc. Ing. Jana Peráčková, PhD.
Ing. Robert Provazník, PhD.
doc. Ing. Ivan Slávik, PhD.
Ing. Martin Sokol, PhD.
doc. Ing. Róbert Sonnenschein, PhD.
Ing. Martin Šimko, PhD.
Ing. arch. Monika Šmiralová, PhD.
Ing. Patrik Šťastný, PhD.
Ing. Pavol Zachar

THE SCIENTIFIC BOARD

prof. Ing. Jana Frankovská, PhD.
prof. Ing. Boris Bielek, PhD.
prof. Ing. Alojz Kopáčik, PhD.
prof. Ing. Milan Čistý, PhD.
prof. RNDr. Karol Mikula, DrSc.
prof. Ing. Dušan Petráš, PhD.
prof. Ing. Silvia Kohnová, PhD.
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.

THE COORDINATING BOARD

doc. Ing. Peter Makýš, PhD.
Ing. Antónia Laščeková
Lucia Škrabáková

The publication has not been corrected.

CONTENT

APLLIED MATHEMATICS

Muhammad Awais Abbasi
GRACE-DRIVEN FEM: COMPARISON OF TRIANGULATED GEOGRAPHIC VS ICOSAHEDRAL GRID FOR MONITORING EARTH´S GRAVITY FIELD 11

Matúš Ďubek
O NEGÁCIÁCH φ-INTUICIONISTICKÝCH MNOŽÍN 20

Juraj Kalafut
PREHĽAD O NEKOMUTATÍVNYCH ASOCIATÍVNYCH AGREGAČNÝCH FUNKCIÁCH 26

Soňa Zajícova, Mária Minárová, Tomáš Klas
LABORATÓRNE MERANIE VISKOELASTICKEJ ODOZVY ŠLIACH 32

BUILDING TECHNOLOGY

Adam Hopocký
VNÚTORNÉ OŠETROVANIE BETÓNU: CESTA K TRVÁCNOSTI 39

Artem Chystiakov, Martin Tocik
DETERMINATION OPTIMAL COMPOSITIONS FOR CONCRETE ON MIXED RECYCLED AGGREGATES 47

Olena Shelvytska
POTENCIÁL MESTSKÉHO PROSTREDIA PRI DEKARBONIZÁCII 55

Adam Tarana
ODHAD STAVEBNÉHO ODPADU V NOVOSTAVBÁCH POMOCOU WGR BENCHMARKU A STROJOVÉHO UČENIA 62

GEODESY AND CARTOGRAPHY

Ondrej Benko
EXPERIMENTÁLNE OVERENIE PRESNOSTI SNÍMOK REKTIFIKOVANÁCH O SKRESLENIE OBJEKTÍVU 70

Ján Brindza
URČENIE PRVKOV VONKAJŠEJ ORIENTÁCIE MEDZI 3D A 2D LIDARMI 78

Natália Faboková
VODA A KATASTER NEHNUTEĽNOSTÍ 86

Aset Madiev
A SCAN-VS-BIM SOFTWARE SOLUTION 93

Jakub Šperka
AUTOMATIZOVANÉ ZÍSKAVANIE A SPRACOVANIE DÁT MISIE SENTINEL-2 NA PRIESTOROVÉ ANALÝZY A STROJOVÉ UČENIE 101

Hana Vesteg
ZISTENIE NESÚLADOV DRUHOV POZEMKOV PRI REVÍZII KATASTRA NEHNUTEĽNOSTÍ 109

THEORY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY OF BUILDINGS

Karolína Gábrišová
KVALITA VNÚTORNÉHO PROSTREDIA V TELOCVIČNIACH ZÁKLADNÝCH ŠKÔL 117

Lucia Hrnčárová
EXPERIMENTÁLNE MERANIE REKUPERAČNÉHO SYSTÉMU PRE VYUŽITIE ODPADOVEJ VODY ZO SPRCHY 125

Branislav Kožák
EFEKTÍVNOSŤ SYSTÉMOV REKUPERÁCIE ODPADOVÉHO TEPLA 133

Lukáš Michalák
KVANTIFIKÁCIA ENERGETICKÝCH ÚSPOR PRI POUŽITÍ DOPYTOVO RIADENÉHO VETRANIA V PODZEMNÝCH GARÁŽACH V KONTEXTE PLATNEJ SLOVENSKEJ TECHNICKEJ NORMY 141

Angelika Václavová, Michal Krajčík
HODNOTENIE STATICKÝCH A SIMULAČNÝCH METÓD PRI NÁVRHU OPATRENÍ NA ZLEPŠENIE ENERGETICKEJ EFEKTÍVNOSTI TYPICKÝCH RODINNÝCH DOMOV 147

THEORY AND STRUCTURES OF BUILDINGS

Ľubomír Adamec
ŠTÚDIA VPLYVU UMIESTNENIA NÍZKOEMISNEJ VRSTVY V ZÁVISLOSTI NA PREHRIEVANIE BUDOV SO ZASKLENOU FASÁDOU POČAS LETNÉHO OBDOBIA 156

Tomáš Hakszer
A COMPARATIVE ANALYSIS OF ELECTROCHROMIC GLAZING AND DYNAMIC BLINDS UNDER REALISTIC, LLM-GENERATED CONTROL SCHEDULES 168

Kristína Hanesová
MOŽNOSTI APLIKÁCIE VYBRANÝCH TYPOV KONŠTRUKCIÍ A KONŠTRUKČNÝCH DETAILOV V DOČASNEJ ARCHITEKTÚRE 183

Kamil Hudák
VEGETAČNÉ FASÁDY: MECHANIZMY TEPELNÉHO PRENOSU A ENERGETICKÉ PRÍNOSY 195

Patrícia Jánošková
VPLYV VONKAJŠÍCH MATERIÁLOV NA VNÚTORNÚ TEPLOTU 205

Tomáš Kadlec
MODRO-ZELENÉ OPATRENIA AKO SÚČASŤ URBANISTICKÉHO NÁVRHU VEREJNÝCH PRIESTOROV 212

Anežka Kašiarová
HYPOTETICKÁ REKONŠTRUKCIA KOSTOLA NANEBOVZATIA PANNY MÁRIE V BANSKEJ ŠTIAVNICI 220

Jozef Olašák
KLIMATICKÝ PRÍNOS VEGETAČNÝCH STRIECH II: RETENCIA DAŽĎOVEJ VODY A MIKROKLIMATICKÁ FUNKCIA 230

Jana Pijáková
EVALUATION OF MERCURY INTRUSION POROSIMETRY FOR THE ASSESSMENT OF RADON EXHALATION 240

Barbora Porkertová
MAPOVANIE OHROZENÝCH OBJEKTOV TRADIČNEJ ARCHITEKTÚRY V KONTEXTE VYUŽITIA CIRKULÁRNEJ EKONOMIKY 249

Nancy Sedláčková
MYCELIUM-BASED BIOCOMPOSITES AS ECO-FRIENDLY THERMAL INSULATION: SORPTION AND THERMAL PROPERTIES 257

Michal Šveda
VPLYV KLIMATICKÝCH PODMIENOK NA TEPLOTU A PRÚDENIE VZDUCHU V MEDZIPRIESTORE DVOJITEJ TRANSPARENTNEJ FASÁDY 264

Veronika Talašová
KLIMATICKÉ ZMENY: SÚČASNÝ STAV V EURÓPE A NA SLOVENSKU A ICH VPLYV NA SPOTREBU ENERGIE V BUDOVÁCH 276

Peter Trudič
VPLYV AERODYNAMIKY NA EXTERIÉROVÉ ZÓNY 284

THEORY AND STRUCTURES OF CIVIL ENGINEERING WORKS

Dárius Bálint
NÁVRH EXPERIMENTÁLNEHO NOSNÍKA VYSTUŽENÉHO GFRP VÝSTUŽOU SO ZAMERANÍM NA ŠMYKOVÚ ODOLNOSŤ 293

Daniel Beutelhauser
PARAMETRICKÁ ANALÝZA DYNAMICKÉHO SPRÁVANIA OBOJSMERNE NOSNEJ ŽELEZOBETÓNOVEJ DOSKY 300

Roman Červenka
SIMULÁCIA TEPLOTNÝCH ÚČINKOV NA PRIEČNU VÄZBU OCEĽOVÉHO RÁMU 306

Tadeáš Fecko
VPLYV MNOŽSTVA OHYBOVEJ VÝSTUŽE NA ŠMYKOVÚ ODOLNOSŤ LOKÁLNE PODOPRETÝCH DOSIEK VYROBENÝCH Z BETÓNU S OBSAHOM HRUBÉHO RECYKLOVANÉHO KAMENIVA 315

Zuzana Haššová
VPLYV SÚDRŽNOSTI PREDPÍNACÍCH LÁN NA CELKOVÉ PÔSOBENIE VOPRED PREDPÄTÝCH NOSNÍKOV 323

Hussein Kamal
STRUT-AND-TIE MODEL ANALYSIS OF DEEP BEAMS INCORPORATING RECYCLED CONCRETE AGGREGATE 333

Michal Kázsmér, Artem Chystiakov
NÁVRH EXERIMENTU DREVO-PLASTOVÉHO KOMPOZITNÉHO NOSNÍKA TLAČENÉHO NA 3D TLAČIARNI 343

Lucia Kondrlová
EXPERIMENTÁLNA ANALÝZA ŠÍRKY TRHLÍN V GFRP VYSTUŽENÝCH NOSNÍKOCH: POROVNANIE S NORMOVÝMI MODELMI 351

Anna Kováčová
NÁVRH VZORIEK ŠTÍHLYCH BETÓNOVÝCH STĹPOV 358

Jakub Kozmon
ANALÝZA VPLYVU TYPICKÝCH PORÚCH PANELOVÝCH BYTOVÝCH DOMOV NA ÚNOSNOSŤ A TUHOSŤ STYKOV A MOŽNOSTI ICH NEDEŠTRUKTÍVNEHO SKÚŠANIA 363

Karolína Mazáčková
NÁVRH UMIESTNENIA MERACÍCH SENZOROV PRE ONLINE MONITOROVANIE MOSTU ILAVA 372

Muhammad Mohsin
VPLYV BIOPOLYMÉRU NA ADSORPČNÉ VLASTNOSTI BENTONITU 377

Samuel Paulík
EXPERIMENTÁLNE OVERENIE POUŽITEĽNOSTI BETÓNU S RECYKLOVANÝM KAMENIVOM PRE MOSTNÉ KONŠTRUKCIE 386

Dana Tomajková
ANALÝZA VPLYVU ŠÍRKY PLOŠNEJ ZÁKLADOVEJ KONŠTRUKCIE NA VÝZNAM KRITÉRIA POSÚDENIA NA MEDZNÝ STAV ÚNOSNOSTI A POUŽÍVATEĽNOSTI 395

Asad Zia
EFFECTIVENESS OF TIRE-SOURCED FIBERS IN RC MEMBERS: STEEL REDUCTION AND BEHAVIOR IMPROVEMENT 403

WATER RESOURCES ENGINEERING

Raghad Awad
HYDRODYNAMICKÁ SIMULÁCIA VPLYVU KLIMATICKEJ ZMENY NA MESTSKÉ ODVODŇOVACIE SYSTÉMY 410

Jana Grečnárová
EXPERIMENTÁLNE MERANIE RETENČNÉHO POTENCIÁLU VEGETAČNÝCH STRIECH 420

Lili Megyer-Muraközy
DATA PROCESSING AND PRELIMINARY REGIME-CHANGE ANALYSIS AT THE HERMES FOREST METEOROLOGICAL STATION (1985-2024) 429

Lynda Paulíková
SÚČINITEĽ ODTOKU: SEZÓNNOSŤ A JEJ VPLYV NA VÝSLEDNÚ VÝŠKU ODHADU 439

Adela Rutzká
KOMBINOVANÉ NUMERICKÉ A FYZIKÁLNE MODELOVANIE PRÚDENIA V PRÍRODE BLÍZKOM RYBOVODE 447

Mitra Tanhapour
VALIDATION OF SENTINEL-3 SNOW COVER OVER AUSTRIA 457

Alexandra Vidová
SIMULÁCIA PRÚDENIA V TECHNICKOM ŠTRBINOVOM RYBOVODE 466

Miriam Zaťovičová
METODIKA NÁVRHU ADAPRAČNÝCH STRATÉGIÍ NA ÚZEMÍ BRATISLAVY POMOCOU ANALÝZY MIKROKLIMATICKÝCH ROZDIELOV ULÍC 458

APLLIED MATHEMATICS

Muhammad Awais Abbasi[1]
Study program: Department of Descriptive Geometry and Applied Mathematics, 2nd year

GRACE-Driven FEM: Porovnanie Triangulovanej Geografickej a Ikosaedrickej Siete na Monitorovanie Gravitačného Poľa Zeme

GRACE-Driven FEM: Comparison of Triangulated Geographic vs Icosahedral Grid for Monitoring Earth's Gravity Field

Abstract

The evolving gravity field of Earth is monitored globally as a critical factor for water security, sea-level assessment, and climate risk evaluation. We present a finite element method (FEM) workflow that assimilates Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) and Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On (GRACE-FO) satellite solutions to model the gravity potential on global meshes and at user-defined nodes. In this article, we implement and compare two global mesh discretization approaches: a conventional geographic (latitude–longitude) triangular mesh and a quasi-uniform icosahedral triangular mesh, both using six-noded elements in ANSYS to balance geometric fidelity with computational cost. Gravity potential values at points of interest are extracted, and surface mass-change patterns are visualized to capture seasonal variability. Overall, the FEM approach complements traditional spherical-harmonic methods by enabling reliable regional analyses and robust local gravity potential estimates from satellite gravimetry.

Keywords:

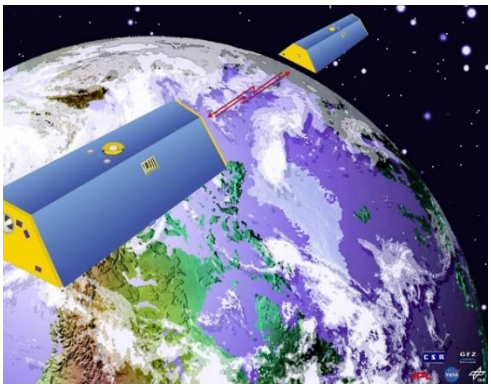
Finite Element Method (FEM); Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE); Earth's gravity field; mesh discretization; satellite gravimetry

1. Introduction

Earth's environment is continually reshaped by interacting processes occurring from the ground beneath our feet to the near-Earth space above. Gradual and nearly imperceptible phenomena such as the steady melting of polar ice sheets have been shown to measurably perturb the planet's gravity field over time, even in the absence of abrupt geological events. These subtle mass redistributions were first observed via satellite gravimetry missions (e.g., the CHAMP mission) [2] and were convincingly detected by the GRACE [1][3], marking the beginning of a new era in monitoring Earth's water and ice reservoirs from space.

The GRACE mission was operated using twin satellites placed in near-circular, near-polar orbits (~500 km altitude, ~89.5° inclination) and separated by approximately 220 km along track (as shown in figure-1(a)). The satellites were connected through a precision K-band microwave ranging system and supported by GPS receivers, high-accuracy accelerometers, and attitude sensors. The primary goal of the mission was the routine production of time-variable gravity field models. From April 2002 to June 2017, monthly and weekly gravity solutions were generated by the Science Data System and distributed as Level-2 spherical harmonic coefficients. These datasets were repeatedly reprocessed to incorporate advances in instrument calibration, background modeling, and processing

standards. They have since become the basis for quantifying mass redistribution associated with hydrology, ice-sheet changes, sea-level variation, and solid-Earth dynamics.



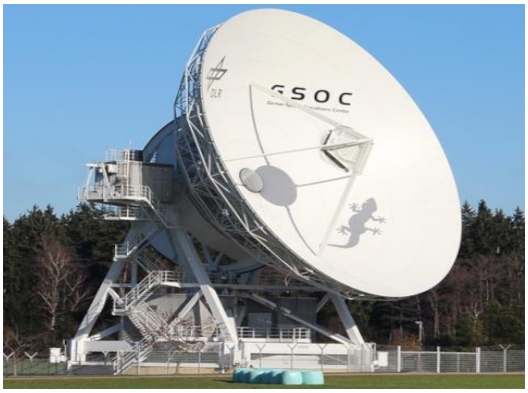


Figure-1(a): Depiction of GRACE satellites orbiting Earth, capturing gravitational field variations.[9] and(b): Ground station enabling data reception for the GRACE satellite mission.

Within this framework, the Finite Element Method (FEM) is utilized as a powerful numerical approach for modeling the gravity potential with geometric fidelity and methodological flexibility. Through the partitioning of complex domains into finite elements, the governing partial differential equations are transformed into algebraic systems capable of handling irregular boundaries, heterogeneous materials, and realistic boundary conditions [4]. FEM has been widely employed across structural mechanics, fluid dynamics, heat transfer, and electromagnetics, and its application in geodesy has been increasingly recognized for the accurate analysis of spatial and temporal variations in the gravity potential and its derivatives. The method is also used to bridge theoretical formulations and observational data by embedding real-world constraints, thereby allowing regional studies that remain consistent with global physical principles.

Based on these advancements, a practical FEM workflow has been developed to assimilate GRACE-derived gravity fields for modeling Earth's gravity potential at both global scales and user-specified locations. Two discretization strategies—a geodetic mesh and icosahedral mesh—have been implemented with six-node elements to maintain a balance between computational efficiency and accuracy. Using these meshes, pointwise gravity-potential values at designated sites are extracted, surface mass-change patterns are visualized, and monthly time series spanning annual to multi-year periods are constructed to capture seasonal and interannual variability. Altogether, FEM is positioned as a complementary technique to spherical-harmonic products, providing dependable local estimation and comprehensive global diagnostics of Earth's time-variable gravity field.

In this paper, we implement and compare two global triangular mesh discretizations: a geographic mesh and a quasi-uniform icosahedral mesh using finite elements to balance computational efficiency with accuracy. Using these FEM models, we extract gravity potential values at user-defined locations and visualize global surface mass-change patterns to capture seasonal and interannual gravity variations. The significance of this work lies in the enhanced modeling fidelity and resolution it offers for satellite gravimetry, which is crucial for real-world applications. Improved gravity-field analyses enable another way to monitor the climate change impacts with better estimation of groundwater depletion and water resources, and refined local gravity-field diagnostics.

2. Formulation of Boundary Value Problem

The gravitational potential, V_g , is computed in a computational domain Ω which represents a spherical layer. Two concentric spherical surfaces bound the domain: the inner sphere Γ_1, which represents the Earth's surface, and the outer sphere Γ_2, which represents the satellite's orbit, see (Figure 2).

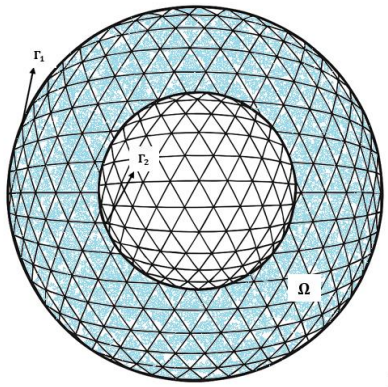


Figure 1: The Computational domain Ω.

Let us consider the Laplace equation in the above-defined domain Ω to solve the Earth's gravitational field model:

$$\Delta V_g\,(x) = 0, x \in \Omega \subset R, \tag{1}$$

$$Vg\,(x) = V_{DIR}(x), \quad \Gamma_1 \subset \partial\Omega \tag{2}$$

$$\frac{\partial V_g(x)}{\partial n \Gamma_2} = g(x), \quad \Gamma_2 \subset \partial\Omega \tag{3}$$

where V_g is the gravitational potential, g is gravity, and $\frac{\partial V_g(x)}{\partial n \Gamma_2}$ is the derivative of V_g in the normal direction to the boundary Γ_2.

3. Methodology of Finite Element Analysis

To solve the above boundary value problem, we employ the finite element method. We first derive the weak form of the governing equation. Multiplying Equation (1) by an arbitrary weight/test function w and integrating over an arbitrary element domain Ω^e, then applying the divergence theorem to transfer derivatives from V to w, we obtain:

$$\int_{\Omega^e} \nabla V_g \cdot \nabla w \, dxdydz = \int_{\partial\Omega^e} \nabla V_g \cdot \hat{n} w \, d\sigma \tag{4}$$

Equation (4) is the weak form of the Laplace equation. It ensures that the residual of the differential equation is orthogonal to the space spanned by the weight functions, yielding an approximate solution that minimizes the residual in an average sense (the method of weighted residuals).

Next, we approximate the unknown value V_g as V^e. We can write a linear combination of basis functions ψ_j with coefficients $V_j^e, j = 1,\ldots,6$.

$$V_g \approx V^e = \sum_{j=1}^{6} V_j^e \; \psi_j, \tag{5}$$

where V^e is the finite element approximation of V_g. Substituting Equation (5) into the weak form, choosing the Galerkin method produces a system of N algebraic equations. By substituting $\boldsymbol{w = \psi_i}$ $i - th$ algebraic equation can be written as:

$$K_{ij}^e = \int_{\Omega^e} \left[\frac{\partial \psi_i}{\partial x}\frac{\partial \psi_j}{\partial x} + \frac{\partial \psi_i}{\partial y}\frac{\partial \psi_j}{\partial y} + \frac{\partial \psi_i}{\partial z}\frac{\partial \psi_j}{\partial z}\right] dxdydz, \qquad Q_i^e = \int_{\partial\Omega^e} q_i\ \psi_i\ d\sigma \tag{6}$$

The term $\boldsymbol{q_i}$ represents the flux of $\boldsymbol{u}$ through the boundary, defined as $\boldsymbol{q_i} = \boldsymbol{\nabla V_g} \cdot \hat{\boldsymbol{n}}$, where $\hat{\boldsymbol{n}}$ is the outward unit normal vector.

In matrix form,

$$\begin{gathered} K_{11}^e V_1^e + K_{12}^e V_2^e + \cdots + K_{1n}^e V_n^e = Q_1^e \\ K_{21}^e V_1^e + K_{22}^e V_2^e + \cdots + K_{2n}^e V_n^e = Q_2^e \\ \cdots \quad \cdots \\ \cdots \quad \cdots \\ \cdots \quad \cdots \\ K_{61}^e V_1^e + K_{62}^e V_2^e + \cdots + K_{6n}^e V_n^e = Q_6^e \end{gathered} \tag{7}$$

In compact matrix form, the algebraic equations (7) can be written as:

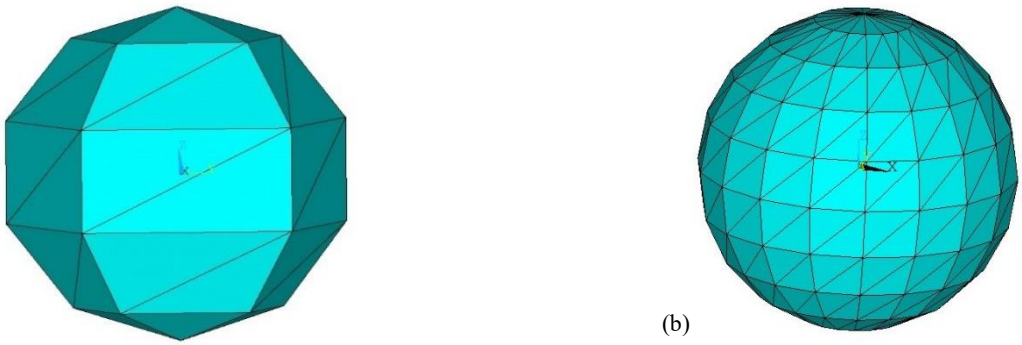
$$K^e\, V^e = Q^e \tag{8}$$

4. Discretization of Computational Domain

Grid selection is pivotal to our monitoring objective because it dictates how faithfully the small, time-variable gravity signals resolved by GRACE are represented numerically, directly affecting gradient accuracy, spatial error uniformity, and the conditioning of the FEM linear system. Accordingly, we compare triangular geographic and icosahedral meshes to identify the discretization best suited to global gravity-field FEM and, by extension, robust Earth-gravity monitoring. To isolate mesh geometry effects, both grids are constructed on the same spherical-shell domain Ω with inner radius $r_1 = 6378$ km and outer radius $r_2 = 6828$ km(approximately 450 km above the surface). In both cases, six-noded quadratic triangular elements were employed (each triangle has three corner nodes and three mid-side nodes). Quadratic shape functions provide second-order interpolation of V over each element, ensuring C_0 continuity of the potential and improved approximation of its gradients. Below, we describe the construction and characteristics of each mesh.

4.1. Triangular Geographic Grid Discretization

In a geographic mesh, the node positions are defined by latitude and longitude on a spherical surface enclosed by specified inner and outer radii. Quadrilateral latitude–longitude patches are divided along their diagonals, and six-noded quadratic triangular elements are formed, each consisting of three vertex and three midside nodes [7]. In our case, the sphere is discretized by dividing longitude 90, latitude 45, and radii into 5 mesh having 24,312 nodes, 40,500 triangular elements obtained by diagonally subdividing lat–lon quadrilateral patches.



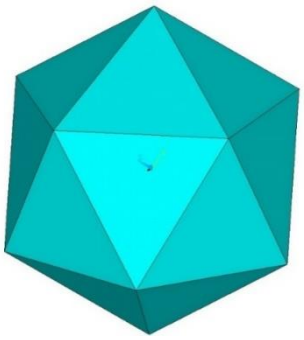
(a) (b)

Figure 2:(a) Represents a Coarse Geographical mesh. Whereas in (b) Refinement by dividing longitude and latitude.

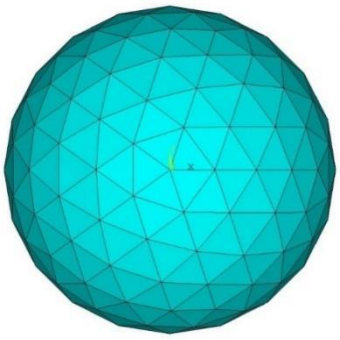
This geographic discretization is straightforward but introduces significant element distortion near the poles. As the meridians converge, triangular elements near the north and south poles become extremely elongated and narrow. After diagonal subdivision of the geographic cells, these triangles retain a high aspect ratio, being stretched in the north–south direction. Such distorted elements can worsen the conditioning of the FEM matrices and reduce solution accuracy.

4.2. Icosahedral discretization

We begin with an icosahedron (a regular polyhedron with 20 triangular faces) inscribed in the sphere. Through hierarchical refinement, each triangular face of the icosahedron is subdivided into smaller triangles, which are then projected onto the spherical surface. By refining the icosahedron and mapping it to the globe, we obtain a dense triangulation of the sphere (Figure 3(a) shows the coarse 20-face icosahedron, and Figure 3(b) shows a more refined icosahedral mesh). This grid is nearly uniform: all triangles are of comparable size and shape, with no singular concentration of elements at the poles [8]. In our work, the icosahedral mesh we regenerate results after 4-fragmentation levels by dividing the radius into 5 shells, consists of 15,372 nodes and 25,600 triangular elements, at a nominal angular resolution of 0.75° (~83 km at the equator).



(a)



(b)

Figure 3:(a) Basic icosahedral mesh with 20 triangular facets. (b) Fragmented icosahedral sphere generated through hierarchical subdivision

5. Numerical Simulation and Convergence Analysis

To check the accuracy of the finite element formulation, exact boundary conditions were implemented in ANSYS [12]. The gravitational potential and gravity were computed using the relations:

$$V_g(6828) = \frac{398600.4418}{6828} \approx 58.37733\ \mathrm{km^2/s^2}.$$

And

$$g = \frac{398600.4418}{(6378)^2} \approx 0.0097987\ \mathrm{km/s^2}.$$

These were applied at the top and bottom boundaries, respectively. Accuracy of the numerical model was evaluated using the Root Mean Square Error (RMSE) and the Experimental Order of Convergence (EOC):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(V_{g,Exact,i} - V_{g,Num,i}\right)^2}.$$

Table 1 : Geographic Grid Results

Elements (long×lat×rad)	RMSE km^2/s^2	EOC	Mean Residual (km^2/s^2)	Max. Residual (km^2/s^2)	Min. Residual (km^2/s^2)
6×3×2	0.432106	---	-0.322906	0.000000	-0.869336
12×6×4	0.115866	1.89	-0.088898	0.000000	-0.241362
24×12×8	0.030708	1.91	-0.023309	0.000392	-0.152822
48×24×16	0.008000	1.94	-0.006180	0.000281	-0.087402

Table 2: Icosahedral Grid Results

Radial × Fragmentation	RMSE km^2/s^2	EOC	Mean Residual (km^2/s^2)	Max. Residual (km^2/s^2)	Min. Residual (km^2/s^2)
1×1	0.177457	---	-0.121313	0.000000	-0.283453
2×2	0.043681	2.02	-0.031974	0.021714	-0.070029
3×3	0.011225	1.96	-0.008291	0.027827	-0.019736
4×4	0.002828	1.98	-0.002209	0.014091	-0.005163

Both geographic and icosahedral meshes were refined successively. The results confirm that both meshes are second-order convergent, validating numerical accuracy. The icosahedral grid produced lower RMSE and smoother residuals due to its uniform geometry and absence of pole distortion.

6. GRACE Data Processing

To incorporate real-world mass variability, monthly GRACE Level 2 gravity field data for **2009** and 2010 were chosen from GFZ Potsdam [10]. The spherical harmonic coefficients were transformed into spatial gravitational potential and Gravity SA values on FEM mesh boundaries using GrafLab, a MATLAB-based tool designed for SH data processing [9]. Precise node coordinates for both spherical surfaces were generated using custom C code, ensuring alignment between the GRACE grid and the finite element mesh. This data assimilation approach ensures that the FEM solutions are consistent with the actual gravity variations measured by GRACE.

7. Post-processing and Visualization

By using ANSYS, each monthly simulation was executed individually, and the resulting finite element solutions described gravitational potential changes at the bottom boundary nodes. These simulation results constituted the primary data for estimating groundwater storage variations, as deeper potential changes were linked to mass shifts caused by subsurface water movement. For each month, the gravitational potential values at the Earth's surface were interpolated and visualized on a

[5] Staniforth, A., & Thuburn, J. (2012). Horizontal grids for global weather and climate prediction models: a review. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *138*(662), 1-26.

[6] Barletta, V. R., Sørensen, L. S., & Forsberg, R. (2013). Scatter of mass changes estimates at basin scale for Greenland and Antarctica. *The Cryosphere*, *7*(5), 1411-1432.

[7] Marotta, A. M., Barzaghi, R., & Sabadini, R. (2025). Spherical Shape Functions for a Six-Node Tri-Rectangular Prism and an Eight-Node Quadrangular Right Prism. *Mathematical and Computational Applications*, *30*(4), 88.

[8] Heikes, R., & Randall, D. A. (1995). Numerical integration of the shallow-water equations on a twisted icosahedral grid. Part I: Basic design and results of tests. *Monthly Weather Review*, *123*(6), 1862-1880.

[9] Bucha, B., & Janák, J. (2013). A MATLAB-based graphical user interface program for computing functionals of the geopotential up to ultra-high degrees and orders. *Computers & Geosciences*, *56*, 186-196.

[10] https://icgem.gfz-potsdam.de/sl/temporal##inst_01_GRACE_GFZ

[11] NASA JPL Space images. Available online: https://science.nasa.gov/photojournal/artists-concept-of-gravity-recovery-and-climate-experiment/.

[12] Thompson, M. K., & Thompson, J. M. (2017). *ANSYS mechanical APDL for finite element analysis*. Butterworth-Heinemann.

8. Results

We produced visualizations of the monthly gravity potential anomalies using both the geographic triangular grid and the icosahedral grid, by selecting the first month as the reference month.

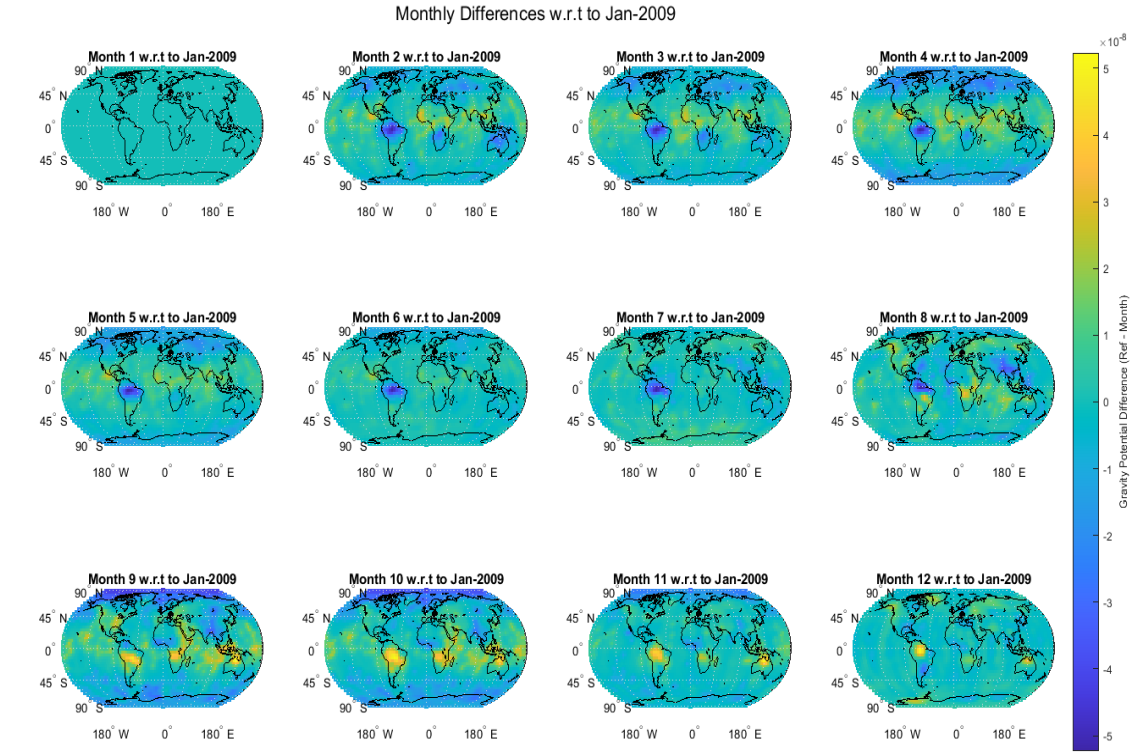


Figure 8(a): Monthly gravity potential (km^2/s^2) anomalies for **2009** relative to January, illustrating global-scale mass redistribution throughout the year using a geographic grid.

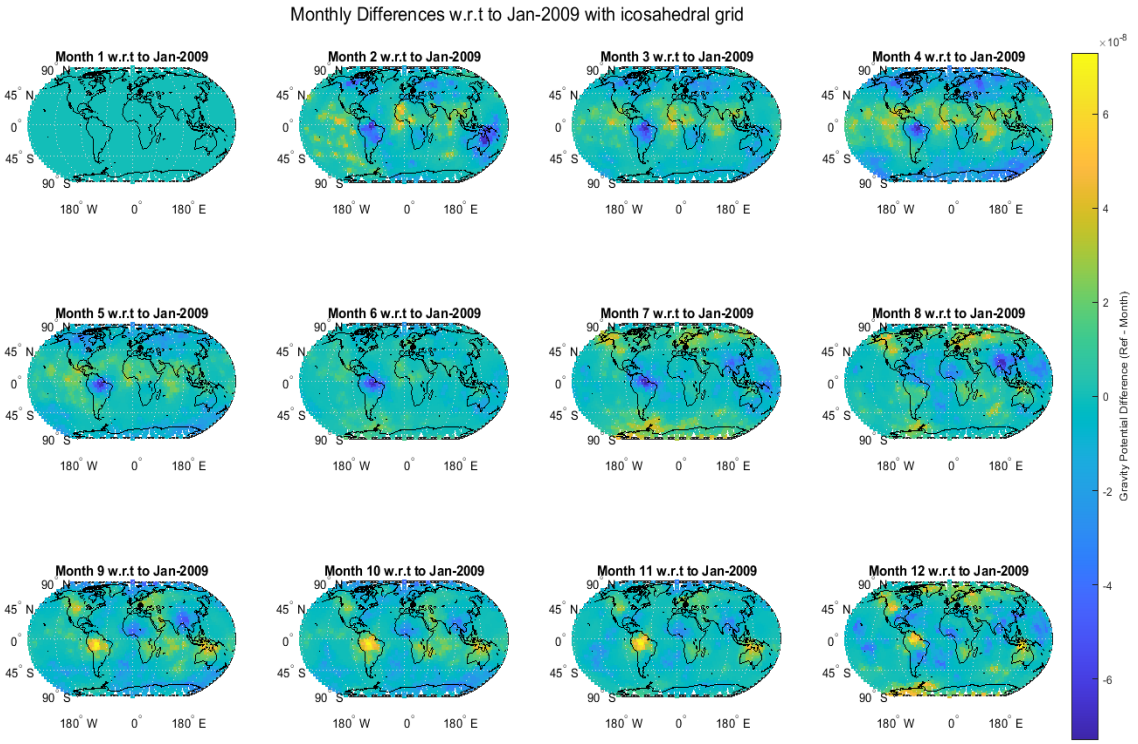


Figure 8(b): Monthly gravity potential(km^2/s^2) anomalies for **2009** relative to January, illustrating global-scale mass redistribution throughout the year using a icosahedral grid.

When we see the above maps, starting from January, negative gravity potential differences gradually develop and intensify through mid-year, with global anomalies reaching approximately -6×10^{-8} km²/s² by July. This trend reflects widespread surface water and snow accumulation during the first half of the year. In the second half, particularly from August onward, the potential begins to recover toward baseline as global terrestrial water storage decreases through runoff, evapotranspiration, and drying. By December 2009 and 2010, most regions show reduced anomalies, completing the cycle of hydrological mass exchange across hemispheres.

9. Conclusion

Both geographic and icosahedral discretization were successfully used to simulate time variable gravity potential changes consistent with GRACE observations; however, the choice of mesh significantly influences the model's performance. The **icosahedral mesh** provided a much more uniform spatial resolution, especially near poles, leading to smoother and more balanced anomaly distributions globally. In contrast, the **triangulated geographic mesh**, while easy to construct and geographically intuitive, exhibited distortions near the poles (due to meridian convergence) and along longitude lines, resulting in localized amplification or suppression of anomalies—particularly visible in polar regions. The polar element convergence in the geographic grid can lead to ill-conditioned system matrices and reduced solution accuracy. The icosahedral mesh avoided these issues and resulted in a more accurate numerical solution.

In summary, our findings underscore the advantage of using quasi-uniform grids for global FEM simulations of geophysical fields, especially when solution regularity and matrix conditioning are concerns. For future geodetic modeling applications that use FEM in combination with satellite gravimetry, these results highlight that mesh design is a critical consideration. Adopting an icosahedral or otherwise quasi-uniform grid can significantly improve the fidelity of regional gravity change estimates and the stability of the computations.

Building on the enhanced accuracy achieved with the quasi-uniform icosahedral mesh, future research will integrate GRACE-FO (2018–present) satellite data to enable extended temporal analysis of Earth's gravity variations. The developed FEM framework will be further expanded to support groundwater depletion, ice-mass balance, and sea-level change monitoring, thereby strengthening its applicability for long-term geophysical and climate assessments.

References

[1] Tapley, B. D., Bettadpur, S., Ries, J. C., Thompson, P. F., and Watkins, M. M. (2004). GRACE measurements of mass variability in the Earth system. science, 305(5683), 503-505.

[2] Reigber, C., Schwintzer, P., and Lühr, H. (1999). The CHAMP geopotential mission. Boll. Geof. Teor. Appl, 40(3-4), 285-289.

[3] Tapley, B. D., Watkins, M. M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., ... and Velicogna, I. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. Nature Climate Change, 9(5), 358-369.

[4] Reddy, J. N. (2005). An introduction to the finite element method (Vol. 3). New York: McGraw-Hill.

Matúš Ďubek[1]
Študijný program: Aplikovaná matematika, 3. ročník:

O negáciách φ-intuicionistických množín

On negations of φ-intuitionistic values

Abstract

***φ*-intuitionistic fuzzy sets generalize several commonly used types, including Atanassov's original intuitionistic fuzzy sets, Pythagorean, and Fermatean fuzzy sets. For all types of fuzzy sets, the negation operator is an essential notion for further development. This paper presents a general axiomatic form of the *φ*-intuitionistic fuzzy negation operator. It presents several special types of such operators and provides a construction theorem for them.**

Kľúčové slová / Key Words
Fuzzy sets, intuitionistic fuzzy set, fuzzy negations, strong negations, involutive negations, automorphisms

1. Introduction

A φ-intuitionistic fuzzy set is a general framework covering several popular types of fuzzy sets, such as Atanassov's original fuzzy sets [1], Pythagorean fuzzy sets [2] or q-rung orthopair fuzzy sets [3]. These frameworks enrich the original idea of a fuzzy set proposed by Zadeh [4] by treating the membership and non-membership as separate values. Generally, one of the key aspects of fuzzy sets is the notion of negation, which is used to model opposition in uncertain or bipolar evaluations, defining logical operations such as implication, and preserving the logical consistency of the framework.

Even though the fuzzy negation is a well-established term in an axiomatic way [5], researchers in the field of intuitionistic (and related) fuzzy sets often choose to approach the problem in a more direct way, by defining specific formulas and studying relations between them. This has led to many different definitions of negation operators, which do not necessarily satisfy the properties intuitively required from such an operator.

In this paper, we propose a general notion of φ-intuitionistic fuzzy negation, introduce some special cases, discuss the connection to current research and provide several construction theorems and examples.

2. Preliminaries

First, we recall the classical concept of a fuzzy set.

[1] Matúš, Ďubek, Ing., Department of Mathematics and Descriptive Grometry, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Definition 1 [4]

A fuzzy set A defined on a non-empty universe od discourse X is a set given by

$$A = \{\langle x, \mu_A(x)\rangle : x \in X\},$$

where μ denotes the membership function the degree to which an element x belongs to the fuzzy set A.

We now recall the definition of a φ-intuitionistic fuzzy set, which generalizes several orthopair-based models.

Definition 2 [5]

An automorphism of the unit interval is a mapping $\varphi : [0,1] \to [0,1]$ that is non-decreasing and satisfies boundary conditions $\varphi(0) = 0$ and $\varphi(1) = 1$.

Definition 3 [6]

A φ-intuitionistic fuzzy set A defined on a non-empty universe of discourse X is a set given by

$$A = \{\langle x, \mu_A(x), \nu_A(x)\rangle : x \in X\} \text{ where } \varphi(\mu_A(x)) + \varphi(\nu_A(x)) \leq 1,$$

μ denote a membership function which determines to what degree an element x belongs to the fuzzy set A and ν denote a non-membership function which determines to what degree an element x does not belong to the fuzzy set A. We will call the tuple of membership and non-membership degrees for a specific element x as a φ-intuitionistic value and denote it with (u_x, v_x).

Definition 4 [6]

Let a, b be two φ-intuitionistic values. Then, $a \leq_l b$ if and only if $u_a \leq u_b$ and $v_a \geq v_b$. We will refer to the partial order $\leq_l$ as the lattice order.

Note that this implies that the set of possible φ-intuitionistic values form a partially ordered set, as elements with $u_a \leq u_b$ and $v_a \leq v_b$ or with $u_a \geq u_b$ and $v_a \geq v_b$ are incomparable. Finally, we introduce the degree of hesitancy, representing the uncertainty remaining after membership and non-membership are specified.

Definition 5 [6]

Let x be a φ-intuitionistic value. Then the degree of hesitancy π is the mapping $\pi: [0,1]^2 \to [0,1]$ given by

$$\pi(u_x, v_x) = \varphi^{-1}\big(1 - \varphi(u_x) - \varphi(v_x)\big).$$

3. Axiomatic view of negations

In the traditional two-valued logic, the negation is uniquely defined, that is, with a function $n_b(x)$: $0,1 \to 0,1$ with $n_b(0) = 1$ and $n_b(1) = 0$. To preserve this property in the framework of fuzzy sets, which extends the possible truth values from $\{0,1\}$ to $[0,1]$, this behavior is preserved axiomatically whenever a fuzzy value coincides with a two-valued one. In addition to these boundary requirements, there is another one that is naturally expected, that is, the negation is non-increasing in order to be order-reversing This leads to the following definition:

Definition 6 [5]

A fuzzy negation is a non-increasing mapping n: $[0,1] \to [0,1]$ that satisfies boundary conditions $n(0) = 1,\ n(1) = 0$.

In addition to these axioms, there are two additional properties that are often considered:

Definition 7 [5]

Let n be a fuzzy negation. Then, it is called:

- strict, if it is strictly decreasing,
- strong, if it is involutive, i.e., if $n\big(n(x)\big) = x$ for all $x \in X$.

The simplest fuzzy negation, $n(x) = 1 - x$, was the original one proposed for fuzzy sets by Zadeh [4]. Another is the parametric class proposed by Yager given by $n^q(x) = (1 - x^q)^{\frac{1}{q}}$. Note that both examples are strong negations. For an example of a negation that is strict, but not strong, consider function $n(x) = 1 - x^2$. For an example of a negation that is not strong nor strict, let n be a drastic negation with $n(x) = 0$ if $x = 1$ and $n(x) = 1$ otherwise. A construction of an arbitrary strict negation can be performed using the following theorem:

Theorem 1 [5]

Let n be a strict fuzzy negation. Then, there exist two automorphisms φ_1, φ_2 which satisfies equality $n(x) = \varphi_1^{-1}\big(1 - \varphi_2(x)\big)$. In addition, if $\varphi_1 = \varphi_2$ for all $x \in [0,1]$, then n is a strong negation.

4. φ-intuitionistic fuzzy negation

When Atanassov first introduced intuitionistic fuzzy sets, he proposed a standard negation that simply swaps the values of membership and non-membership. This simple approach was adopted in all derived models, so it naturally became a standard negation for φ-intuitionistic values. During later development, numerous different functions were considered as an alternative to the standard negation [7] of different types of φ-intuitionistic values However, a research gap remains between studying and comparing specific functions and having a general form from which one can construct arbitrary negation.

To define a negation function for φ-intuitionistic values in an axiomatic sense, that is analogous to the one defined for classical fuzzy values, we need to follow the same pattern, i.e.,

preserving the two-valued negation and order-reversion. Satisfying the boundary conditions is trivial, as values $(1,0)$ and $(0,1)$, which represent total membership and total non-membership, respectively, coincide with the two-valued logic. The order-reversing property is ensured by the negation being non-increasing. Since possible φ-intuitionistic values form a lattice structure instead of a chain, the property is satisfied with respect to the lattice order $\leq_l$. These requirements yield the following axiomatic definition.

Definition 8

Let φ be an arbitrary automorphism and let IV_φ denote a set of possible φ-intuitionistic values. A φ-intuitionistic fuzzy negation is a mapping $\Phi: \mathrm{IV}_\varphi \to \mathrm{IV}_\varphi$ that satisfies the following properties:

- $\Phi(1,0) = (0,1)$,
- $\Phi(0,1) = (1,0)$,
- $\Phi(u_1, v_1) \geq \Phi(u_2, v_2)$ whenever $(u_1, v_1), (u_2, v_2) \in IV_\varphi$ satisfy $u_1 \leq u_2$ and $v_1 \geq v_2$.

Definition 9

Let Φ be a φ-intuitionistic fuzzy negation. Then it is called

- domain-preserving, if its codomain is equal to its domain,
- strong, if it satisfies equality $\Phi\big(\Phi(u, v)\big) = (u, v)$.

Note that if the negation is not domain-preserving, the negation process always leads to an increase in the hesitancy degree, which can be particularly useful in applications where change of opinion results in a weaker belief about its correctness.

As the range of this negation consists of two values, it can be naturally split into two parts where the result membership and non-membership values are calculated by separate functions. Both functions may, but do not necessarily, depend on both membership and non-membership degree of the original value. The most important case is when the resulting membership depends on the original non-membership and vice versa, which covers the standard negation. We will refer to such negations as representable and we will focus on this case throughout the rest of this contribution. The construction of representable φ-intuitionistic negation is described by the following theorems.

Theorem 2

Let Φ be a φ-intuitionistic fuzzy negation. Then, there exist automorphisms ψ_1, ψ_2 that generate Φ with the formula

$$\Phi(u, v) = \big(\psi_1(v), \psi_2(u)\big).$$

Theorem 3

Let φ, ψ_1, ψ_2 be an automorphism and n_φ be a strong negation generated by φ. Then, ψ_1 and ψ_2 generate a φ-intuitionistic fuzzy negation if and only if they satisfy the following inequality:

$$\psi_1(x) \geq n_\varphi\Big(\psi_2\big(n_\varphi(x)\big)\Big), \quad \text{for all } x \in [0,1].$$

It follows that one can obtain the standard φ-intuitionistic negation by selecting $\psi_1(x) = \psi_2(x) = x$.

Theorem 4

Let Φ be a φ-intuitionistic fuzzy negation. Then it is

- Domain-preserving, if ψ_1, ψ_2 satisfy the equality $\psi_1(x) = n_\varphi\left(\psi_2\left(n_\varphi(x)\right)\right)$,
- strong, if there exists a strong fuzzy negation n for which ψ_1, ψ_2 satisfy the equalities $\psi_1(x) = \varphi^{-1}\left(n\left(1-\varphi(x)\right)\right)$ and $\psi_2(x) = \varphi^{-1}\left(1 - n\left(\varphi(x)\right)\right)$, where φ is the automorphism generating the corresponding φ-intuitionistic fuzzy set.

As examples of different types of representable negations, let $\varphi(x) = x$ and consider the following φ-intuitionistic negations:

- $\Phi_1(u,v) = \left(\sqrt{1-(1-v)^2}, 1-\sqrt{1-u^2}\right)$,
- $\Phi_2(u,v) = (v^{2,}1-(1-u)^2)$,
- $\Phi_3(u,v) = (v^2, u^2)$.

Function Φ_1 is an example of a strong φ-intuitionistic negation. Function Φ_2 is order-preserving, but not strong, and function Φ_3 is neither strong nor order-preserving.

5. Conclusions

In this contribution, we introduced a general notion of a φ-intuitionistic fuzzy negation. We provided an axiomatic definition, construction theorems, and examples for these operations. In addition, we discussed the relationship between the proposed approach and existing intuitionistic-related frameworks.

In our future research, we plan to further investigate the properties of proposed negations, non-representable cases, and their potential applications in developing implication operators and modeling real-life scenarios.

6. References

[1] ATANASSOV, K. T.: Intuitionistic Fuzzy Sets. *VII ITKR Session*, Sofia, 20-23 June 1983.
[2] YAGER, R. R.: Pythagorean Membership Grades in Multicriteria Decision Making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2014, vol. 22, no. 4, pp. 958-965.
[3] YAGER, R. R.: Generalized Orthopair Fuzzy Sets. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2017, vol. 25, no. 5, pp. 1222-1230.
[4] ZADEH, L.A.: Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965, vol. 8, no. 3, pp. 338-353. ISSN 01650114.
[5] TRILLAS, E.: Sobre funciones de negación en la teoría de conjuntos difusos. *Stochastica*. 1979, vol. 3, no. 1, pp. 47-60.

[6] ĎUBEK, M., ŠELIGA, A.: General framework for intuitionistic values and related fuzzy sets based on automorphisms (submitted in TMMP).

[7] ANGELOVA, N. & ATANASSOV, K. (2021). Research on intuitionistic fuzzy negations. *Notes on Intuitionistic Fuzzy Sets*. 27. 18-31. 10.7546/nifs.2021.27.3.18-31.

Juraj Kalafut[1]
Študijný program: Aplikovaná matematika, 4. ročník:

PREHĽAD O NEKOMUTATÍVNYCH ASOCIATÍVNYCH AGREGAČNÝCH FUNKCIÁCH

REVIEW ON NON-COMMUTATIVE ASSOCIATIVE AGGREGATION FUNCTIONS

Abstract

This paper presents the recent results on non-commutative associative aggregation functions on the unit interval. The focus is on associative functions, which are at least partially continuous, with special focus on pseudo-t-norms, pseudo-uninorms, and pseudo-n-uninorms. The results show that although the structure of non-commutative associative aggregation functions is still somewhat similar to the commutative case, the limitations of commutative construction methods—such as the ordinal and z-ordinal sums—become apparent in the non-commutative setting. All of these together led to the introduction of a new construction method, which preserves associativity and is non-commutative itself.

Kľúčové slová / Key Words
Pseudo-uninorm; Pseudo-n-uninorm; semi-t-operator; ordinal sum; z-ordinal sum; non-commutative ordinal sum; Archimedean component

1. Introduction

Aggregation functions are a fundamental tool for combining multiple pieces of information into a single representative value. Traditionally, research has focused on commutative and associative aggregation functions, which ensure that the order of inputs is irrelevant and grouping does not affect the outcome. Such properties make them suitable for a wide range of applications in mathematics, decision theory, and fuzzy logic.

However, in many contexts, the assumption of commutativity is too restrictive. When the order of inputs plays an important role in aggregation, for instance, in processes with temporal or sequential dependence, a commutative aggregation fails to capture the underlying structure. This motivates the study of non-commutative associative aggregation functions, which preserve the flexibility of retaining the robustness of associativity.

In this paper, we review the mathematical properties, characterizations, and examples of non-commutative associative aggregation functions which were recently published in peer-reviewed journals.

2. Preliminaries

[1] Juraj, Kalafut, Mgr., Department of Mathematics and Descriptive Grometry, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

First, we recall the definitions of the most common classes of associative aggregation functions.

Definition 1 [1,2,3]

An associative aggregation function is called

- Pseudo-t-norm T if T has the neutral element 1.
- Pseudo-t-conorm S if S has the neutral element 0.
- Pseudo-uninorm U if U has the neutral element $e \in [0,1]$.
- Pseudo-n-uninorm U^n if U^n has the n-neutral element $\{e_1, \dots, e_n\}_{z_1,\dots,z_{n-1}}$.
- Semi-t-operator O if $O(0,\cdot), O(\cdot,0), O(\cdot,1), O(1,\cdot)$ are continuous functions.

Dropping the prefix pseudo or semi, respectively, means commutativity of the respective operations.

Definition 2 [4]

Let $a, b, c, d \in [0,1]$ with $a < b < c < d$, $v \in [b, c]$. Then

a) a semigroup $(\ ]a,b[\cup v \cup]c,d[, *)$ is called a representable semigroup if $*$ is isomorphic to a restriction of a representable uninorm to $]0,1[^2$,
b) a semigroup $(]a,b[, *)$ is called a t-strict semigroup if $*$ is linearly isomorphic to a restriction of a strict t-norm to $]0,1[^2$,
c) a semigroup $(]c,d[, *)$ is called an s-strict semigroup if $*$ is linearly isomorphic to a restriction of a strict t-conorm to $]0,1[^2$,
d) a semigroup $([a,b[, *)$ is called a t-nilpotent semigroup if $*$ is linearly isomorphic to a restriction of a nilpotent t-norm to $[0,1[^2$,
e) a semigroup $(]c,d], *)$ is called an s-nilpotent semigroup if $*$ is linearly isomorphic to a restriction of a nilpotent t-conorm to $]0,1]^2$.

In [5], based on the preceding work of Hölder, it was shown that continuous pseudo-t-norms and continuous t-norms coincide. Since pseudo-t-conorms and pseudo-t-conorms are dual aggregation functions, their characterization is directly obtained. Note that each continuous t-(co)norm can thus be described as an ordinal sum of semigroups b,d (c,e) from Definition 2.2 and trivial semigroups [5,6].

Each non-commutative associative and continuous aggregation function is a continuous semi-t-operator. From the structure based on its underlying functions, which are a t-norm and a t-conorm, the characterization is a trivial consequence of the previous paragraph.

3. Pseudo-uninorms

The structure of pseudo-uninorms is significantly similar to the structure of uninorms. The unit square can be divided into 4 rectangles, in which the behavior of a pseudo-uninorm differs. Let e denote a neutral element of a pseudo-uninorm U then

- U restricted to $[0,e]^2$ is isomorphic to a pseudo-t-norm.
- U restricted to $[e,1]^2$ is isomorphic to a pseudo-t-conorm.
- For all $(x,y) \in [0,e] \times [e,1] \cup [e,1] \times [0,e]$, $min(x,y) \leq U(x,y) \leq max(x,y)$ holds.

No pseudo-uninorm is continuous and the discontinuity must occur somewhere in $[0,e] \times [e,1] \cup [e,1] \times [0,e]$. The most important pseudo-uninorms are those with continuous underlying functions, i.e., continuous on $[0,e]^2 \cup [e,1]^2$. Since the only idempotent t-norm is the minimum and the only idempotent t-conorm is the maximum, both of which are continuous functions, thus each idempotent pseudo-uninorm also belongs to the class of pseudo-uninorms with continuous underlying functions.

Idempotent pseudo-uninorms were characterized in [7] by Clifford's ordinal sum of trivial semigroups. It was shown that each idempotent pseudo-uninorm is internal, which means that $U(x,y) \in \{x,y\}$ for all $(x,y) \in [0,1]^2$. This result extended the previous characterization of idempotent uninorms, which was done by the characterizing function in [8]. Note that in the case of an idempotent pseudo-uninorm, if $U(x,y) \neq U(y,x)$ then points $(x,y),(y,x)$ lie on a graph of the characterizing function.

In [9], pseudo-uninorms with continuous Archimedean underlying functions were studied. The complete characterization of pseudo-uninorms with continuous underlying functions was done in [10]. The process of characterization was two-fold. At first authors identified the possible non-commutative pairs, i.e., $(x,y),(y,x) \in [0,1]$ such that $U(x,y) \neq U(y,x)$, observing that then both x and y are idempotent points of U. Second, they redefined U to become commutative uninorm and they used the characterization of uninorms with continuous underlying functions from [4]. Their findings can be summarized as follows.

Theorem 3 [4]

Let $U: [0,1]^2 \longrightarrow [0,1]$ be a pseudo-uninorm with continuous underlying functions and neutral element $e \in]0,1[$. Then $([0,1], U)$ can be expressed as a Clifford's ordinal sum of a countable number of semigroups from Definition 2, a possibly uncountable number of trivial semigroups, and a possibly uncountable number of non-commutative idempotent semigroups defined on two elements, where the corresponding semigroup operation is the projection to one of the coordinates.

4. Pseudo-n-uninorms

n-uninorms were originally proposed by Akkela as a common ground for nullnorms and uninorms [11]. Idempotent n-uninorms were later characterized as a z-ordinal sum of trivial semigroups [12]. The structure of a pseudo-n-uninorm U^n with n-neutral element $\{e_1, \ldots, e_n\}_{z_1,\ldots,z_{n-1}}$. is similar to the structure of an n-uninorm and can be described as follows.

- U^n restricted to $[z_{i-1}, e_i]^2$ is isomorphic to a pseudo-t-norm.
- U^n restricted to $[e_i, z_i]^2$ is isomorphic to a pseudo-t-conorm.
- U^n restricted to $[z_{i-1}, z_i]^2$ is isomorphic to a pseudo-uninorm.
- U^n restricted to $[e_i, e_{i+1}]^2$ is isomorphic to a pseudo-nullnorm.
- U^n restricted to $[z_i, z_j]^2$ is isomorphic to a pseudo-(j-i)-uninorm.

Those n-uninorms which are continuous on $\cup_{i=1}^{n} [z_{i-1}, e_i]^2 \cup [e_i, z_i]^2$ we will refer to as pseudo-n-uninorms with continuous underlying functions.

In [3], idempotent pseudo/n/uninorms were studied. It was observed that a general idempotent pseudo-n-uninorm may not be obtained via z-ordinal sum. Therefore, an inductive approach for their characterization was proposed. This process goes via repeating two steps.

a) Identify the set of one-sided annihilators $A = \{a_1, \dots, a_m\}$. If A is not a subset of $\{0,1\}$ then we can reduce the size of n and study the values of U^n only on respective subdomains. Since outside of these subdomains U^n is piece-wise constant, attaining values from A.
b) If $A \subset \{0,1\}$ then U^n is an ordinal sum of a pseudo-uninorm and a pseudo-n-uninorm where A is not a subset of $\{0,1\}$.

Observe that if n reduces to 1, then a pseudo-uninorm is obtained, and thus the characterization is complete.

However, as was observed previously, the z-ordinal sum is no longer suitable for the construction of non-commutative functions, such as semi-t-operators, pseudo-n-uninorms, etc. Therefore, Mesiarová-Zemánková proposed a new summand-based method for constructing associative functions, which is non-commutative itself [13]. She called this new method the non-commutative ordinal sum, and it relates to an idempotent associative function. In [13], continuous semi-t-operators were characterized as a non-commutative ordinal sum of semigroups b-e from Definition 2.

Finally, such a new approach brought a new insight into the structure of a general pseudo-n-uninorm. The characterization of all pseudo-n-uninorms with continuous underlying functions was done recently in [14]. The main findings can be summarized as follows.

Theorem 4 [14]

Let $n \in \mathbb{N}$ and let $U^n: [0,1]^2 \to [0,1]$ be a pseudo-n-uninorm with continuous underlying functions. Then $([0,1], U^n)$ can be expressed as a non-commutative ordinal sum of a countable number of semigroups from Definition 2 and a possibly uncountable number of trivial semigroups.

Note that the structure of all non-decreasing associative commutative functions continuous around the main diagonal is significantly similar to the structure of n-uninorms with continuous underlying functions. Both of them are just a z-ordinal sum of semigroups from Definition 2 and trivial semigroups (see [15] and [16] for more details). If we extend the approach done in [15] for commutative non-decreasing associative functions continuous around the main diagonal, also for non-commutative, we obtain that each non-commutative non-decreasing associative aggregation function can be constructed as a non-commutative ordinal sum of semigroups from Definition 2 and trivial semigroups.

5. Conclusions

In this contribution, we have reviewed recent advances in the study of non-commutative associative aggregation, primarily based on the works of Mesiarová-Zemánková and Kalafut. Although it followed the steps taken in the commutative case, several important differences arose, the most notable being the new construction method, the non-commutative ordinal sum, and its usage

in the characterization of important classes of non-commutative associative aggregation functions on the unit interval.

Now, there are two possible areas for research. The first one is to drop the assumption of continuity at all. However, this can lead to several peculiarities in the structure of aggregation functions. The still missing characterization of all t-norms supports this claim, since t-norms are one of the simplest and important associative aggregation functions.

The other possibility is to focus on non-commutative associative aggregation functions on lattices and partially ordered sets. Nowadays, this field attracts increasing interest from researchers, possessing several different aspects in comparison with the unit interval. Specifically, on the non-commutative associative aggregation functions, only a few pioneering works have been published yet, most notably [17, 18, 19] among others.

6. References

[1] SANDER, W.: -Associative Aggregation Operators. In: *Aggregation Operators*. (Eds. CALVO, T. – MAYOR, G. – MESIAR, R.) Physica Verlag Heidelberg New York, 2002, pp. 124-158. ISBN 3-7908-1468-7.

[2] DRYGAŚ, P.: Distributivity between semi-t-operators and semi-nullnorms. *Fuzzy Sets and Systems*. 2015, n.264, pp. 100-109. ISSN 0615-0114.

[3] KALAFUT, J. and MESIAROVÁ-ZEMÁNKOVÁ, A.: Idempotent pseudo-n-uninorms. *Fuzzy Sets and Systems,* 2025, n. 513, 109387. ISSN 0615-0114.

[4] MESIAROVÁ-ZEMÁNKOVÁ, A.: Characterization of uninorms with continuous underlying t-norm and t-conorm by means of the ordinal sum construction. *International Journal of Approximate Reasoning,* 2017, n. 83, pp. 176-192. ISSN 0888-613X.

[5] KLEMENT, E.P. et al.: *Triangular norms*. Dordrecht: Springer, 2000. 387 pp. ISBN 978-0-7923-6416-0.

[6] MOSTERT P.S. and SHIELDS, A.L.: On the structure of semigroups on a compact manifold with boundary. *Annals of Mathematics,* 1967, n. 65(1), pp. 117-143. ISSN 0003-486X.

[7] MESIAROVÁ-ZEMÁNKOVÁ, A.: Decomposition of idempotent pseudo-uninorms via ordinal sum. *Information Sciences*, 2023, n. 648, 119519.

[8] DE BAETS, B.: Idempotent uninorms. *European Journal of Operational Research.* 1999, n. 118(3), pp.631-642. ISSN 0377-2217.

[9] MESIAROVÁ-ZEMÁNKOVÁ, A. and KALAFUT, J.: Pseudo-uninorms with continuous Archimedean underlying functions. *Fuzzy Sets and Systems,* 2023, n. 471, 108674. ISSN 0615-0114.

[10] KALAFUT, J. and MESIAROVÁ-ZEMÁNKOVÁ, A.: Decomposition of pseudo-uninorms with continuous underlying functions via ordinal sum. *Information Sciences,* 2025, n. 690, 121573. ISSN 0020-0255.

[11] AKKELA, P.: Structure of n-uninorms. *Fuzzy Sets and Systems,* 2007, n. 158(15), pp. 1631-1651. ISSN 0615-0114.

[12] MESIAROVÁ-ZEMÁNKOVÁ, A.: Characterization of idempotent n-uninorms. *Fuzzy Sets and Systems,* 2022, n. 427, pp. 1-22. ISSN 0615-0114.

[13] MESIAROVÁ-ZEMÁNKOVÁ, A.: Non-commutative ordinal sum. *Fuzzy Sets and Systems,* 2025, n. 507, 109308. ISSN 0615-0114.

[14] KALAFUT, J. and MESIAROVÁ-ZEMÁNKOVÁ, A.: The structure of pseudo-n-uninorms with continuous underlying functions. *Mathematica Slovaca,* (accepted). ISSN 0139-9918.

[15] MESIAROVÁ-ZEMÁNKOVÁ, A.: Commutative, associative and non-decreasing functions continuous around diagonal. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, 2022, n. 19(2), pp. 31-48. ISSN 1735-0654.

[16] MESIAROVÁ-ZEMÁNKOVÁ, A.: Characterization of n-uninorms with continuous underlying functions via z-ordinal sum construction. *International Journal of Approximate Reasoning,* 2021, n. 133, pp 60-79. ISSN 0888-613X.

[17] FANG, B.W. and HU, B.Q.: Semi-t-operators on bounded lattices. *Information Sciences,* 2019, n. 490, pp. 191-209. ISSN 0020-0255.

[18] KALAFUT, J. and MESIAROVÁ-ZEMÁNKOVÁ, A.: Idempotent pseudo-uninorms on special bounded lattices. *Semigroup Forum,* 2025, 111(1), pp. 163-190. ISSN 0037-1912.

[19] KALAFUT, J.: Exploring divisibility and related properties of t-norms on finite lattices. In: Books of Abstracts EUSFLAT 2025. Riga, University of Latvia, 2025, pp. 72. ISBN 978-9934-556-79-1.

Soňa Zajícová[1], Mária Minárová[2], Tomáš Klas[3]
Študijný program: Aplikovaná matematika, ročník: 3

LABORATÓRNE MERANIE VISKOELASTICKEJ ODOZVY ŠLIACH

LABORATORY MEASUREMENT OF TENDONS VISCOELASTIC RESPONSE

Abstract
This work investigates the viscoelastic behaviour of tendon tissue through laboratory testing and mathematical modelling. Experiments were performed on bovine tendons to observe their deformation under sustained load, confirming indicated viscoelastic characteristics. The obtained data were compared with the Burgers rheological model, which effectively captures both elastic and time-dependent deformation components. Although some measurements were interrupted due to tendon slippage from the clamps, the essential creep trend was clearly identifiable. The results demonstrate that the Burgers model is suitable for describing short-term biomechanical loading of tendon tissue.

Key Words
Burgers model; viscoelasticity; creep test; tendon.

1. Viscoelasticity, theoretical background

Viscoelasticity describes the mechanical behaviour of materials that combine both elastic and viscous properties [1]. Such materials deform under external load and, unlike purely elastic solids, exhibit a time-dependent recovery after unloading. This dual behaviour arises from their internal structure, in which energy is partially stored elastically and partially dissipated through internal friction [2]. Examples of viscoelastic substances include polymers, biological tissues, asphalt mixtures, and many engineering materials subjected to long-term loading.

When analysing viscoelastic systems, the relationship between stress σ and strain ε, referred to as the constitutive relation, is always a function of time. During loading and unloading, a hysteresis effect may appear, indicating the loss of mechanical energy through viscous dissipation [1].

1.1 Elementary matters

Viscoelastic behaviour is commonly represented using two fundamental mechanical elements: the Hookean elastic body (H) and the Newtonian viscous body (N). The elastic element stores potential energy, while the viscous element dissipates it as heat.

The one-dimensional constitutive relations for these elements are [3]:

$$(H): \sigma = E\varepsilon \tag{1}$$

$$(N): \sigma = \eta\dot{\varepsilon} \tag{2}$$

[1] Ing. Soňa Zajícová, Slovak University of Technology, Radlinského 11, 810 05 Bratislava.
[2] doc. RNDr. Mária Minárová, PhD., Slovak University of Technology, Radlinského 11, 810 05 Bratislava.
[3] Ing. Tomáš Klas, PhD., Slovak University of Technology, Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

where E $[Pa]$ is Young's modulus and η $[Pa \cdot s]$ is the dynamic viscosity coefficient. While E and η are material characteristics, $\dot{\varepsilon}$ is referring to the speed of deformation $\frac{d\varepsilon}{dt}$.

In multidimensional analysis, both stress and strain are tensors of the second order, while material parameters are represented by fourth-order tensors. For the purposes of this work, only a one-dimensional case is considered. A schematic representation of the two basic elements is shown in Figure 1.

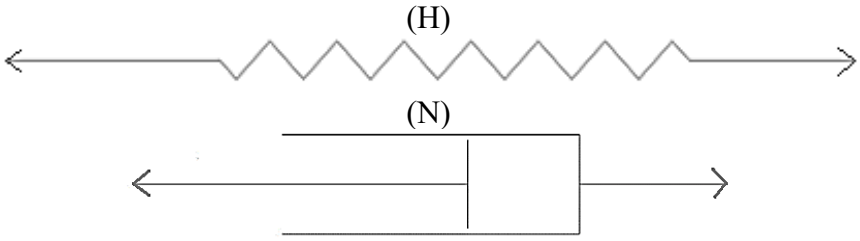


Figure 1: Hooks elastic matter (upper image) and Newtons viscous matter (lower image) [4].

1.2 Configuration

By combining the elementary elements (H) and (N) either in series $(-)$ or in parallel $(|)$, several viscoelastic models can be formed. The most fundamental configurations are the Maxwell model and the Kelvin–Voigt model, illustrated in Figure **2**.

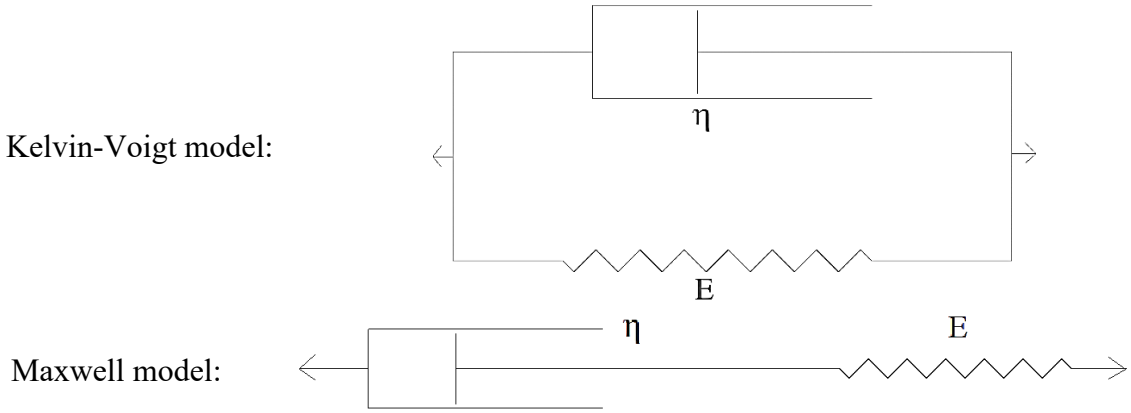


Figure 2: Parallel connection (upper image) and connection in series (lower image) [4].

In a parallel connection (Kelvin–Voigt model), both elements experience the same strain but share the total stress [1]:

$$\varepsilon = \varepsilon_H = \varepsilon_N\,, \qquad \sigma = \sigma_H + \sigma_N \tag{3}$$

For a connection in series (Maxwell model), the total strain equals the sum of individual strains, while the stress remains identical in both elements [1]:

$$\varepsilon = \varepsilon_H + \varepsilon_N\,, \qquad \sigma = \sigma_H = \sigma_N \tag{4}$$

Using indices H and N, the physical equations for the individual components are written as [1]:

$$\sigma_H = E\varepsilon_H\,, \qquad \sigma_N = \eta\dot{\varepsilon}_N \tag{5}$$

1.3 Constitutive equations

Constitutive equations express the overall relationship between stress and strain for each viscoelastic model [3]. Their derivation is based on the geometric conditions (3), (4) and the physical laws (5) that define the component elements.

1.3.1 Kelvin-Voigt model

The Kelvin–Voigt (KV) model represents a parallel connection of one spring and one dashpot (see Figure **2**). Substituting (5) into (3) yields the constitutive relation [3]:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon} \tag{6}$$

This model describes materials that deform gradually when subjected to stress, as the viscous element resists the instantaneous motion of the elastic spring. Upon unloading, the deformation decreases progressively until full recovery is achieved. The Kelvin–Voigt model is suitable for materials such as rubber or biological tissues that show slow but fully recoverable deformation.

1.3.2 Maxwell model

The Maxwell model (M) connects an elastic and a viscous element in series (see Figure **2**). Using equations (4) and (5), and eliminating internal variables, the resulting global constitutive relation is [3]:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\mathrm{E}}\dot{\sigma} + \frac{1}{\eta}\sigma \tag{6}$$

The model captures stress relaxation (the gradual decrease of stress under constant strain) but it cannot represent complete recovery after unloading due to the viscous element. It is often used for materials like asphalt, soft polymers, or tissues under long-term load, where deformation accumulates over time.

1.3.3 Burgers model

The Burgers model combines the (KV) and (M) models in series (Figure **3**). It therefore contains four elements: two springs and two dashpots.

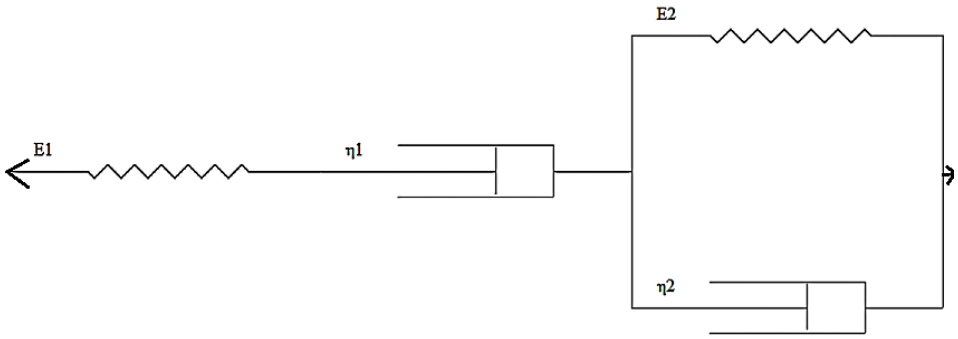


Figure 3: Structural representation of the Burgers model $(\boldsymbol{H_1}) - (\boldsymbol{N_1}) - ((\boldsymbol{H_2}) \mid (\boldsymbol{N_2}))$ [4].

The derivation of the constitutive equation for the Burgers model follows the same general approach as for simpler viscoelastic systems, combining the geometric and physical relations of the individual elements, but the process is considerably more involved. Because the model consists of two sub-models connected in series, each with its own internal variables, several substitutions and differentiations are required to eliminate intermediate stresses and strains. The whole derivation process can be found in [1]. As a result, the final constitutive relation is derived in the form:

$$\eta_1\eta_2\ddot{\sigma} + (\mathrm{E}_2\eta_1 + \mathrm{E}_1\eta_1 + \mathrm{E}_1\eta_2)\dot{\sigma} + \mathrm{E}_1\mathrm{E}_2\sigma = \mathrm{E}_1\eta_1\eta_2\ddot{\varepsilon} + \mathrm{E}_1\mathrm{E}_2\eta_1\dot{\varepsilon} \tag{7}$$

which is a second-order differential equation, that captures both the instantaneous elastic response and the time-dependent viscous flow of the material [1].

This formulation provides a realistic representation of the mechanical response of biological soft tissues such as tendons, which exhibit an immediate deformation upon loading followed by a gradual creep. The Burgers model will therefore be used in the following chapter to interpret laboratory measurements of tendon viscoelastic behaviour and to compare theoretical predictions with experimental results. A comparable viscoelastic response has been modelled using the Burgers rheological structure for polymer fibres designed as tendon substitutes [5] and for human plantar aponeurosis [1].

2. *Laboratory measurement*

The experimental part of this work focuses on the measurement of the viscoelastic response of a beef tendon. Laboratory testing was conducted in collaboration with the Department of Steel and Timber Structures, with the assistance of Ing. Tomáš Klas, PhD. The tested samples consisted of beef tendons obtained both from home breeding (Figure 4 a) and from a slaughterhouse. Prior to measurement, the tendons were defrosted in a 0.9% saline solution [6], thoroughly cleaned of residual muscle and fat tissue.

Figure 4: a) Cleaned tendons from home breeding. b) Measurement of the cross-section. c) Tendon inside the machine during the process of loading and unloading.

Initial measurements were performed to determine the maximum load the tendon could withstand. Subsequently, several loading functions were applied to investigate the material response under different conditions. The application of linearly increasing or decreasing force was comparatively simple to execute. In contrast, the implementation of a piecewise constant load was more challenging, as the testing machine was unable to maintain a perfectly constant force over time. As a result, the applied load fluctuated slightly around the desired target value.

Afterwards, the experimental results were compared with a mathematical model. The Burgers viscoelastic model introduced in the previous chapter was selected, as it captures both the immediate elastic response provided by the spring in the series configuration and the gradual viscous deformation that follows due to the dashpots. This makes the model well suited for representing the time-dependent behaviour observed in tendon tissue.

2.1 Creep test

Initial measurements, which were performed to determine the maximum load capacity, were unsuccessful. The measured tendon was too slippery and over a certain force was applied the clamps could not restrain the tendon form slipping out. Due to sample failure, subsequent tests were carried out with loads kept below 2000 N. For each tendon, the length between clamps and cross-sectional area were recorded (Figure 4 b), allowing for precise stress–strain evaluation during the experiment.

Figure 5 depicts one of the creep tests. The applied load is presented in Figure 5 a) as a force over time graph, from which stress can be calculated based on the tendon's cross-sectional area. Because an instantaneous load application is not physically possible in real life, the force was gradually increased to approximately 1500 N over the first 13 seconds. It then remained close to this value until around 185 seconds, when the tendon began to slip from the clamps, and the test had to be terminated prematurely.

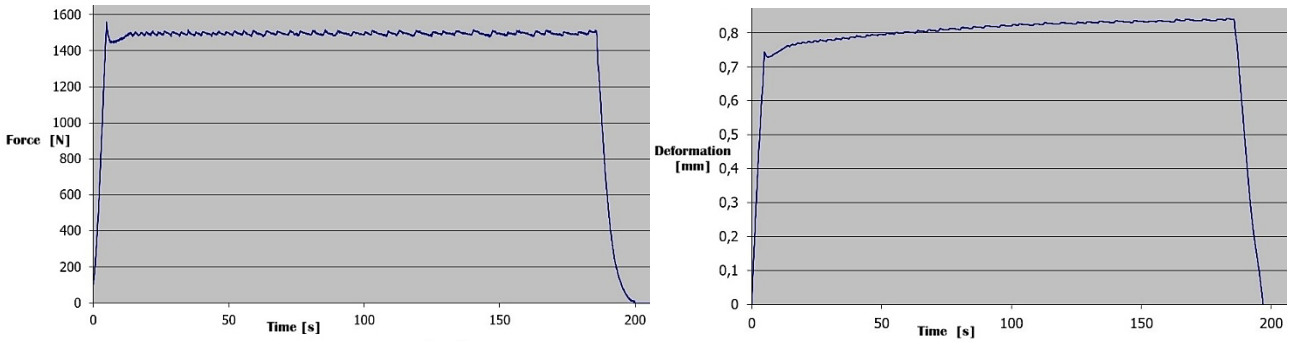


Figure 5: a) Applied force during creep test. b) Measured deformation.

Figure 5 b) presents the corresponding deformation response of the tendon. An immediate elastic deformation of approximately 0.73 mm is followed by a slower, time-dependent viscoelastic deformation exceeding 0.8 mm. Despite the tendon slipping from the clamps before the test could be completed, the characteristic creep behaviour is clearly identifiable in the recorded data. Therefore, a comparison with the Burgers viscoelastic model is appropriate.

2.1.1 Viscoelastic modelling

The following action function was chosen for comparison of experimental results with the Burgers viscoelastic model (see Figure 6 a):

$$\sigma(t) = \begin{cases} \sigma^* t & 0 \le t \le 13 \\ \sigma^* & 13 < t < 185 \end{cases} \tag{8}$$

where $\sigma^* = \frac{F}{A} = \frac{1500}{0.007*0.018}$. Using the constitutive equation (7), which is a second order differential equation, the materials response $\varepsilon(t)$ was calculated (see Figure 6 b). The material constants E_1, E_2, η_1, η_2 were estimated to match the properties of the measured tendon.

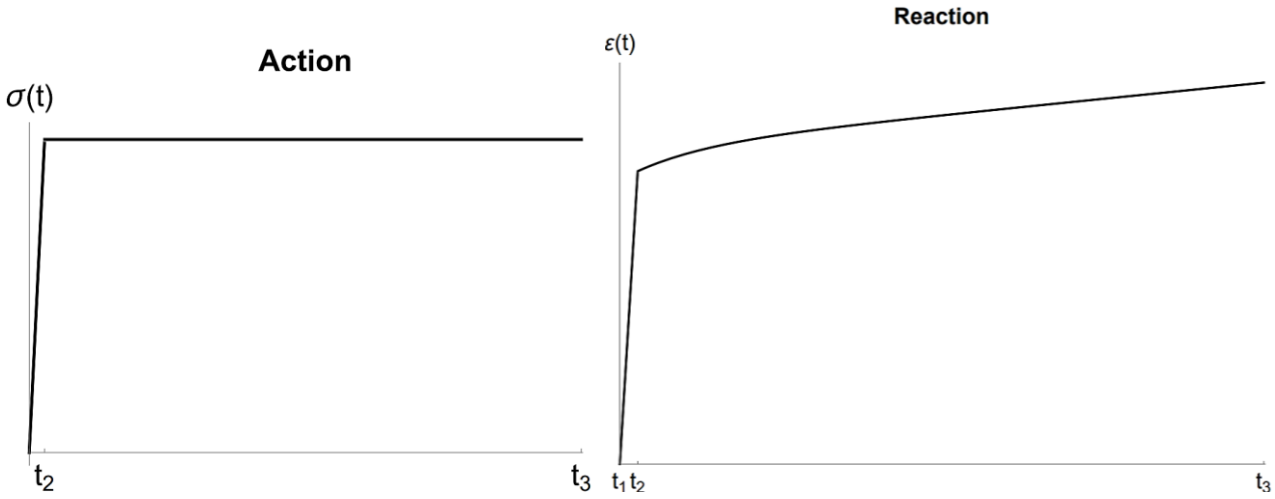


Figure 6: a) Action stress function $\boldsymbol{\sigma(t)}$*. b) Reaction strain function* $\boldsymbol{\varepsilon(t)}$

In the strain response ε(t), the initial jump in deformation corresponds to the elastic behaviour. This is followed by a gradual, slower increase, indicating the influence of the viscous components.

To conclude, creep test confirmed that tendons behave as viscoelastic materials, first deforming elastically and then continuing to creep over time. Some measurements were affected by tendon slippage, but this can be avoided in future tests by using cryo clamps [6]. The Burgers model captured the observed behaviour well and is suitable for modelling tendon response under loading.

Bibliography

[1] MINÁROVÁ, M.: *Rheology: Fundamentals, Tools, Examples.* Bratislava : Slovenská technická univerzita, 2025. ISBN 978-80-227-5479-8

[2] KREJCI, P.: *Hysteresis, convexity and dissipation in hyperbolic equations*. Tokyo: Gakkotosho, 1996.

[3] MINÁROVÁ, M, and SUMEC, J.: *Constitutive equations for selected rheological models in linear viscoelasticity*. In: Advances and Trends in ESaT II (pp. 225-230): CRC Press, 2016.

[4] ZAJÍCOVÁ, S.: *Chain and recurrent viscoelastic structures* (Diploma thesis). Bratislava : Slovenská technická univerzita, 2021.

[5] GUEDES, R. M., SINGH, A., and PINTO, V.: *Viscoelastic modelling of creep and stress relaxation behaviour in PLA-PCL fibres*. In: Fibers and Polymers, 2017, 18.12: 2443-2453.

[6] DOMNICK, C. et al.: *Evaluation of biomechanical properties: are porcine flexor tendons and bovine extensor tendons eligible surrogates for human tendons in in vitro studies?*. In: Archives of orthopaedic and trauma surgery, 2016, 136.10: 1465-1471.

BUILDING TECHNOLOGY

Adam Hopocký [1]
Študijný program: Technológie stavieb (3.stupeň), ročník: 3

VNÚTORNÉ OŠETROVANIE BETÓNU: CESTA K TRVÁCNOSTI

Internal Curing of Concrete: A Pathway to Durability

Abstract
Self-curing concrete (SCC) constitutes a progressive advancement in construction materials, enabling enhanced cement hydration through internal water supply and thereby minimizing dependence on conventional external curing practices. Its application is particularly advantageous in structural elements exposed to severe climatic fluctuations or in components where access to traditional curing methods is impractical or technically constrained. The utilization of SCC has the potential to improve structural durability, reduce the demand for labor-intensive curing processes, and increase the overall efficiency of construction operations. This article provides a comprehensive overview of the fundamental mechanisms of self-curing technology, critically assesses its technical performance and economic implications, and outlines prospective directions for further development. Special attention is devoted to the evaluation of materials and admixtures that are suitable for use under European environmental and regulatory conditions, thereby supporting sustainable construction practices and promoting a more efficient allocation of natural and technological resources.

Kľúčové slová
Progresívne ošetrovanie betónu; samoošetrovanie betónu; poruchy; ľahkých kamenív

1. Úvod

Betón je po vode celosvetovo najpoužívanejším materiálom, jeho globálna spotreba sa odhaduje na viac než jednu tonu na obyvateľa ročne, čo poukazuje na jeho zásadný význam pre modernú civilizáciu a infraštruktúru. Dlhodobá životnosť a mechanická spoľahlivosť betónových konštrukcií sú však úzko determinované priebehom a kvalitou hydratácie cementu, ktorá rozhodujúcim spôsobom ovplyvňuje výslednú mikroštruktúru a parametre nie len cementového kameňa ale aj celej konštrukcie. Hydratačný proces je výrazne závislý od vhodného ošetrovania čerstvého betónu, ktorého primárnym cieľom je zabezpečiť dostatočnú dostupnosť vody a minimalizovať riziko predčasného vysušenia.

Tradičné metódy ošetrovania sa zakladajú najmä na obmedzení odparovania povrchovej vlhkosti (napr. pomocou fólií, membránových náterov či polievania) alebo na dodatočnom dopĺňaní vody do konštrukcie. Napriek tomu tieto postupy vykazujú významné obmedzenia – ich účinnosť je citlivá na klimatické podmienky, prístupnosť konštrukčných prvkov a vyžaduje intenzívnu pracovnú činnosť, čo znižuje ich efektívnosť pri rozsiahlych či technicky náročných projektoch.
S rastúcimi nárokmi na kvalitu, trvanlivosť a udržateľnosť stavebných konštrukcií sa preto zvyšuje odborný záujem o inovatívne spôsoby ošetrovania betónu. Jednou z progresívnych alternatív je tzv. vnútorné ošetrovanie – samoošetrovanie betónu. Tento prístup využíva materiály s vysokou retenčnou kapacitou, akými sú napríklad presaturované ľahké kamenivo, ktoré je schopné zadržať

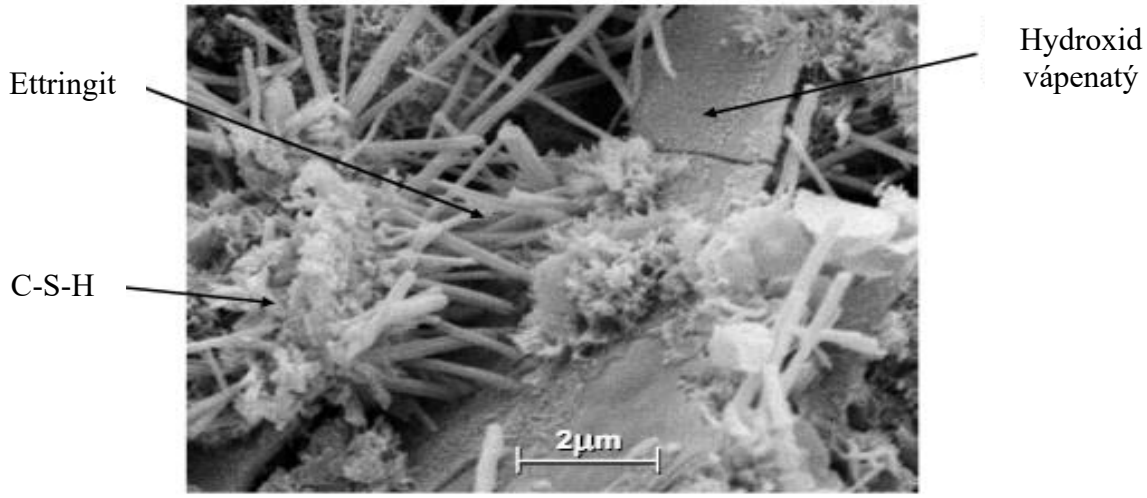
[1] Adam Hopocký, Ing., Radlinského 2766/11 810 05 Staré Mesto Bratislava

značné množstvo vody a postupne ju uvoľňovať do cementovej matrice počas prebiehajúcej hydratácie.

Takto zabezpečená rovnomerná a neprerušovaná hydratácia cementu v celom objeme konštrukcie vedie k redukcii autogénneho zmršťovania, obmedzeniu vzniku mikrotrhlín a k vytvoreniu kompaktnejšej mikroštruktúry. V dôsledku toho dochádza k zvýšeniu dlhodobej trvanlivosti, zlepšeniu mechanických vlastností a predĺženiu životnosti betónových konštrukcií, čo robí z tejto technológie perspektívny nástroj pre súčasné aj budúce stavebníctvo.

2. Nedostatočná hydratácia cementu a poruchy s ňou spojené

Proces hydratácie cementu je súbor chemických reakcií medzi minerálmi portlandského slinku a vodou. Vznikajú pritom produkty ako hydrát kremičitanu vápenatého (C-S-H gél), hlavný nositeľ pevnosti, a hydroxid vápenatý ($Ca(OH)_2$), ktorý udržiava silne alkalické prostredie a plní ďalšie dôležité funkcie. Rýchle reakcie C_3A s vodou sa regulujú prídavkom síranu vápenatého, čím sa tvorí ettringit. [1] Hydratácia je exotermická – uvoľnené teplo ovplyvňuje rýchlosť tuhnutia a vývoj mikroštruktúry. Výsledkom je postupná premena plastickej zmesi na pevný kompozit s charakteristickou mikroštruktúrou.



Obrázok 1: SEM snímka hydratačných produktov Portlandského cementu počas hydratácie [2]

Adekvátne ošetrovanie betónu dostatočným množstvom vody je kľúčové pre elimináciu dvoch zásadných negatívnych dôsledkov ktorými môžu takéto kompozitné konštrukcie trpieť.
V prvom rade, pri nedostatku vlhkosti sa hydratačné reakcie cementu spomaľujú až nakoniec sa úplne zastavia, čo obmedzuje nie len rozvoj pevnosti ale aj zhoršuje celkovú mikroštruktúru výsledného materiálu.

V druhom rade, rýchly a nadmerný úbytok vody spôsobuje zmrašťovanie betónu na základe ktorého vznikajú vnútorné napätia, ktoré častokrát vedú k tvorbe mikrotrhlín a trhlín [3].

Správne ošetrovanie je preto nevyhnutné na zníženie priepustnosti a prevenciu vzniku trhlín v ranom veku, čo v konečnom dôsledku zvyšuje životnosť betónu a redukuje náklady na jeho údržbu [4].
Nedostatočná hydratácia cementu v betóne, betónových konštrukciách spôsobuje viaceré poruchy. Najčastejšie poruchy s popisom príčiny ich vzniku, fázy v ktorej vznikajú a ich negatívnych dôsledkov sú obsiahnuté v Tabuľke 1 nižšie.

Tabuľka 1: Porovnanie najčastejších porúch mladého betónu spôsobených nedostatočnou hydratáciou cementu

Druh poruchy	Príčina vzniku	Fáza vzniku	Dôsledky	Zdroj
Plastické zmrašťovacie trhliny (PSC)	Rýchla evaporácia povrchovej vody vedie k vzniku kapilárnych meniskov a ťahového napätia (PCAP), ktoré je vyššie ako pevnosť betónu v plastickom stave.	Plastický stav (pred počiatočným tuhnutím)	Estetické defekty; vytvára dráhy pre prienik agresívnych médií, znižuje trvanlivosť.	[5]
Prášivosť (Dusting/ Laitance)	Zvýšenie lokálneho w/c pomeru pri vpracovaní „vykrvácanej“ vody alebo dehydratácia povrchu pri zlom ošetrovaní, prípadne raná karbonizácia.	Počiatočné tvrdnutie	Znížená odolnosť proti obrusu; vysoká pórovitosť, akcelerovaná karbonizácia krycej vrstvy.	[6]
Mikroskopické trhliny a zvýšená priepustnosť	Predčasné ukončenie hydratácie v jadre (samovysychanie) alebo kolaps štruktúry v dôsledku extrémne vysokého PCAP.	Ranné tvrdnutie	Zníženie dlhodobej pevnosti a E-modulu; dramatické zvýšenie koeficientu difúzie chloridov.	[7]

Poruchy spomínané v Tabuľke 1 ako aj ostatné defekty betónových konštrukcií nielenže znižujú okamžitú funkčnosť konštrukcie, ale zásadným spôsobom ohrozujú jej dlhodobú životnosť, keďže vytvárajú dráhy pre prenikanie škodlivých látok a urýchľujú procesy degradácie.

Pre minimalizáciu v ideálnom príde úplne odstránenie sú intenzívne vyvíjané a rozvíjané inovatívne technológie ošetrovania, ktoré dokážu zabezpečiť dlhodobejšiu dostupnosť vody pre hydratačné procesy a minimalizovať riziko vzniku defektov. A to všetko v súbehu so zlepšením efektívnosti ekonomických prostriedkov vynaložených na procesy spojené s ošetrovaním. Avšak v prípade vzniku takýchto defektov je nutné ich presné, rýchle odhalenie a posúdenie už v rannom veku betónu[8].

Vyzdvihnutie významu ošetrovania, vrátane implementácie moderných prístupov, je preto kľúčové pri prevencii vád betónu a predstavuje základný predpoklad trvanlivých a ekonomicky efektívnych konštrukcií.

3. Materiály vhodné pre samoošetrovanie betónu

Spoločným menovateľom všetkých uvedených materiálov je schopnosť absorbovať, akumulovať a následne riadeným spôsobom uvoľňovať vodu (desorpcia) do cementovej matrice. Týmto mechanizmom sa dosahuje kontinuálne zásobovanie hydratačných reakcií cementu vodou v celom priereze konštrukcie, čím sa predchádza samovysychaniu a lokálnemu zastaveniu hydratácie. Tento proces vedie k vytvoreniu kompaktnejšej mikroštruktúry s nižšou pórovitosťou a lepšou distribúciou hydratačných produktov, čo sa prejavuje zlepšením mechanických vlastností betónu, vyššou pevnosťou v tlaku a znížením objemových zmien súvisiacich so zmršťovaním. Navyše, obmedzenie tvorby mikrotrhlín znižuje priepustnosť konštrukcie a prispieva k zvýšeniu jej dlhodobej odolnosti a trvanlivosti.

Výskumné organizácie sa v súvislosti so zvyšovaním účinnosti vnútorného ošetrovania betónu zamerali na využitie ľahkých pórovitých kamenív (LWA) [9], ktoré vďaka svojej vysokej nasiakavosti dokážu pôsobiť ako rezervoár vody dostupnej pre následnú hydratáciu cementu. Alternatívne riešenia zahŕňajú aplikáciu pórovitých super jemných práškov [10], ktoré disponujú veľkým špecifickým povrchom a kapilárnou štruktúrou umožňujúcou sorpciu a postupné uvoľňovanie vody. Skúmané boli tiež umelé kamenivá s normálnou hmotnosťou [11], ktoré po vhodnej úprave vykazujú priaznivé retenčné schopnosti, a taktiež prírodné vlákna [12], schopné zadržiavať vodu vo svojich kapilárnych priestoroch a následne ju redistribuovať do cementovej matrice.

Ďalší prístup sa opiera o využitie chemických ošetrovacích médií, medzi ktorými dominujú superabsorpčné polyméry (SAP) [13], schopné opakovane zväčšiť svoj objem vplyvom hydratácie a následne uvoľňovať vodu v súlade s požiadavkami systému, a polyetylénglykol (PEG) [14], ktorý funguje na princípe regulácie odparovania vody a spomaľovania procesu vysúšania betónu.

Hoci v dostupnej literatúre a technických správach zatiaľ absentujú jednoznačné dôkazy o realizácii technológie vnútorného ošetrovania betónu v podmienkach našich a okolitých krajín, výsledky medzinárodných výskumov poskytujú dostatočne silné základy pre jej potenciálne uplatnenie aj v našich podmienkach.

Na základe analýzy mechanizmu hydratácie, hodnotenia lokálnych klimatických podmienok, skúseností s dostupnými druhmi kameniva a technologických možností výroby betónu možno konštatovať, že najperspektívnejším riešením pre praktickú implementáciu je využitie ľahkého pórovitého kameniva. Tabuľka 2 kategorizuje ľahké kamenivá na základe STN 13 055.

Tabuľka 2: Kategorizácia ľahkých kamenív podľa STN 13 055 [15]

Pôvodný materiál	**Ozn.**	**Zvláštne materiály pre LK**
Prírodné LK	LA1	Pemzy
	LA2	Troska
	LA3	Tuf
Umelé LK z pôvodných prírodných materiálov	LB1	Expandovaný íl
	LB2	Expandovaný lupok
	LB3	Expandovaná bridlica
	LB4	Expandovaný perlit
	LB5	Odlupovaný vermikulit
Umelé LK z vedľajších výrobkov z priemyselnej výroby alebo z recyklovaného pôvodného materiálu	LC1	Spekaný popolček
	LC2	Popolček tmelený za studena
	LC3	Spenená vysokopecná troska
	LC4	Expandovaná granulovaná vysokopecná troska
	LC5	Expandované sklo
	LC6	Spenené sklo
LK ako vedľajší výrobok z priemyselnej výroby	LD1	Škvara
	LD2	(Pecná) škvara (BA, FBA)
	LD3	Popolček (FA, PFA)

4. Záver

Samoošetrovanie betónu predstavuje progresívnu technológiu, ktorá dokáže účinne vyplniť slabé miesta a v niektorých prípadoch eliminovať limity tradičných metód ošetrovania prostredníctvom zabezpečenia kontinuálnej dostupnosti vody pre hydratačné procesy cementu. Tento prístup je obzvlášť významný v kontexte požiadaviek na zvýšenie trvanlivosti, minimalizáciu vzniku porúch a podporu udržateľného rozvoja stavebníctva.

Analýza dostupných poznatkov ukazuje, že medzi viacerými skúmanými materiálmi sa ako najperspektívnejšie v našich podmienkach javí využitie ľahkých pórovitých kameniv, ktoré vďaka svojej vysokej retenčnej schopnosti umožňujú efektívne vnútorné zásobovanie cementovej matrice vodou. Tento prístup umožňuje efektívne riadenie vnútorného zásobovania vodou počas hydratácie cementu, čím sa zabezpečí kontinuálny vývoj mikroštruktúry, zníženie rizika vzniku trhlín v dôsledku autogénneho zmršťovania a zároveň predĺženie životnosti konštrukcií. Vzhľadom na synergický efekt medzi schopnosťou ľahkých kameniv viazať a postupne uvoľňovať vodu, dostupnosťou materiálových zdrojov v regióne a kompatibilitou s existujúcimi technologickými postupmi výroby a spracovania betónu predstavuje tento spôsob samoošetrovania optimálny smer pre aplikáciu v našich podmienkach.

Vzhľadom na absenciu priamych aplikácií tejto technológie v našom regióne je nevyhnutné experimentálne overenie jej účinnosti a prispôsobenie špecifickým podmienkam miestneho prostredia. V ďalšej fáze výskumu bude preto pozornosť zameraná na experimentálne skúšanie betónových zmesí s použitím ľahkého kameniva, so zreteľom na retenčnú kapacitu, mechanické vlastnosti výsledného kompozitu a dlhodobú trvanlivosť. Tieto výsledky poskytnú nielen nové poznatky pre akademickú obec, ale aj praktické odporúčania pre implementáciu samoošetrovania v stavebnej praxi.

Použitá literatúra:

[1]Aali Alizadeh. Nanostructure and Engineering Properties of Basic and Modified Calcium-Silicate-Hydrate Systems. 2009. DOI.org (Datacite), https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3892.8089. [Online] ku dňu 2.10.2025, dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/282611085_Nanostructure_and_Engineering_Properties_of_Basic_and_Modified_Calcium-Silicate-Hydrate_Systems
[2] Aali Alizadeh. Nanostructure and Engineering Properties of Basic and Modified Calcium-Silicate-Hydrate Systems. 2009. DOI.org (Datacite), https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3892.8089. [Online] ku dňu 2.10.2025, dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/282611085_Nanostructure_and_Engineering_Properties_of_Basic_and_Modified_Calcium-Silicate-Hydrate_Systems
[3] Schlitter, J., Henkensiefken, R., Castro, J., Raoufi, K., and Weiss, J. (2010). Development of Internally Cured Concrete for Increased Service Life, Final Report, FHWA/IN/JTRP-2010/10, Joint Transportation Research Program.
[4] Cusson, D., Lounis, Z., and Daigle, L. (2010). "Benefits of Internal Curing on Service Life and Life-Cycle Cost of HighPerformance Concrete Bridge Decks – A Case Study," Cement and Concrete Composites, 32(5), 339-350.
[5] Briatka P.(2011). Úvod do ošetrovania betónu 1 V letnom období; Výrobky, hmoty, materiály; materiály pre stavbu; 1/2011; 22 -26. [Online] ku dňu 2.10.2025, dostupné na: https://www.tsus.sk/data/att/397.pdf
[6] Natioal Ready Mixed Concrete Association. CIP 5 – Plastic Shrinkage Cracking. [Online] ku dňu 2.10.2025, dostupné na: https://www.irmca.com/hubfs/22598385/cip5_-_plastic_shrinkage_cracking.pdf

[7] Briatka P.(2010). Eliminácia vzniku trhlín betónu z dôvodu plastického zmrašťovania – Elimination of cocnrete cracking owing to plastic shrinkage; Stavební konstrukce; Beton 2/2011; 34 -39.[Online] ku dňu 2.10.2025, dostupné na:https://www.tsus.sk/data/att/405.pdf
[8] Hong, M., Lei, D., Hu, F., & Chen, Z. (2023). Assessment of void and crack defects in early-age concrete. *Journal of Building Engineering*, *70*, 106372. [Online] ku dňu 2.10.2025, dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106372
[9]Kevern, J.T.; Nowasell, Q.C. Internal curing of pervious concrete using lightweight aggregates. Constr. Build. Mater. 2018, 161, 229–235. [Online] ku dňu 2.10.2025, dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.055
[10] Van, V.-T.A.; Rößler, C.; Bui, D.-D.; Ludwig, H.-M. Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete. Cem. Concr. Compos. 2014, 53, 270–278. [Online] ku dňu 2.10.2025, dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.015
[11] Abate, S.Y.; Song, K.-I.; Song, J.-K.; Lee, B.Y.; Kim, H.-K. Internal curing effect of raw and carbonated recycled aggregate on the properties of high-strength slag-cement mortar. Constr. Build. Mater. 2018, 165, 64–71. [Online] ku dňu 2.10.2025, dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.035
[12] Jongvisuttisun, P.; Leisen, J.; Kurtis, K.E. Key mechanisms controlling internal curing performance of natural fibers. Cem. Concr. Res. 2018, 107, 206–220. [Online] ku dňu 2.10.2025, dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.007
[13] Woyciechowski, P.P.; Kalinowski, M. The Influence of Dosing Method and Material Characteristics of Superabsorbent Polymers (SAP) on the Effectiveness of the Concrete Internal Curing. Materials 2018, 11, 1600. [Online] ku dňu 2.10.2025, dostupné na: https://doi.org/10.3390/ma11091600
[14] Chand, M.S.R.; Giri, P.S.N.R.; Pancharathi, R.K.; Kumar, G.R.; Raveena, C. Effect of self curing chemicals in self compacting mortars. Constr. Build. Mater. 2016, 107, 356–364. [Online] ku dňu 2.10.2025, dostupné na: https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1160843
[15] STN 13 055 Ľahké kamenivo

[1] ALIZADEH, Aali: Nanostructure and Engineering Properties of Basic and Modified Calcium-Silicate-Hydrate Systems. [online]. 2009. [cit. 2.10.2025]. DOI: 10.13140/RG.2.1.3892.8089. Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/282611085_Nanostructure_and_Engineering_Properties_of_Basic_and_Modified_Calcium-Silicate-Hydrate_Systems
[2] ALIZADEH, Aali: Nanostructure and Engineering Properties of Basic and Modified Calcium-Silicate-Hydrate Systems. [online]. 2009. [cit. 2.10.2025]. DOI: 10.13140/RG.2.1.3892.8089. Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/282611085_Nanostructure_and_Engineering_Properties_of_Basic_and_Modified_Calcium-Silicate-Hydrate_Systems
[3] SCHLITTER, J. et al.: Development of Internally Cured Concrete for Increased Service Life. Final Report. West Lafayette : Joint Transportation Research Program, 2010. FHWA/IN/JTRP-2010/10.
[4] CUSSON, D. – LOUNIS, Z. – DAIGLE, L.: Benefits of Internal Curing on Service Life and Life-Cycle Cost of HighPerformance Concrete Bridge Decks – A Case Study. Cement and Concrete Composites. 2010, roč. 32, č. 5, s. 339-350. ISSN
[5] BRIATKA, P.: Úvod do ošetrovania betónu 1 V letnom období. Výrobky, hmoty, materiály [online]. 2011, roč. 1, s. 22-26. [cit. 2.10.2025]. Dostupné na: https://www.tsus.sk/data/att/397.pdf
[6] NATIOAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION: CIP 5 – Plastic Shrinkage Cracking. [online]. [cit. 2.10.2025]. Dostupné na: https://www.irmca.com/hubfs/22598385/cip5_-_plastic_shrinkage_cracking.pdf
[7] BRIATKA, P.: Eliminácia vzniku trhlín betónu z dôvodu plastického zmrašťovania. Stavební konstrukce [online]. 2011, roč. Beton 2/2011, s. 34-39. [cit. 2.10.2025]. Dostupné na: https://www.tsus.sk/data/att/405.pdf
[8] HONG, M. et al.: Assessment of void and crack defects in early-age concrete. Journal of Building Engineering [online]. 2023, roč. 70, s. 106372. [cit. 2.10.2025]. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.106372. Dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106372
[9] KEVERN, J. T. – NOWASELL, Q. C.: Internal curing of pervious concrete using lightweight aggregates. Constr. Build. Mater. [online]. 2018, roč. 161, s. 229–235. [cit. 2.10.2025]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.055. Dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.055
[10] VAN, V.-T. A. et al.: Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete. Cem. Concr. Compos. [online]. 2014, roč. 53, s. 270–278. [cit. 2.10.2025]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.07.015. Dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.015
[11] ABATE, S. Y. et al.: Internal curing effect of raw and carbonated recycled aggregate on the properties of high-strength slag-cement mortar. Constr. Build. Mater. [online]. 2018, roč. 165, s. 64–71. [cit. 2.10.2025]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.035. Dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.035
[12] JONGVISUTTISUN, P. – LEISEN, J. – KURTIS, K. E.: Key mechanisms controlling internal curing performance of natural fibers. Cem. Concr. Res. [online]. 2018, roč. 107, s. 206–220. [cit. 2.10.2025]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.02.007. Dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.007
[13] WOYCIECHOWSKI, P. P. – KALINOWSKI, M.: The Influence of Dosing Method and Material Characteristics of Superabsorbent Polymers (SAP) on the Effectiveness of the Concrete Internal Curing. Materials [online]. 2018, roč. 11, s. 1600. [cit. 2.10.2025]. DOI: 10.3390/ma11091600. Dostupné na: https://doi.org/10.3390/ma11091600

[14] CHAND, M. S. R. et al.: Effect of self curing chemicals in self compacting mortars. Constr. Build. Mater. [online]. 2016, roč. 107, s. 356–364. [cit. 2.10.2025]. DOI: 10.1080/19648189.2016.1160843. Dostupné na: https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1160843
[15] STN 13 055 Ľahké kamenivo.

Artem Chystiakov[1]
Študijný program: Technológia stavieb, 3. stupeň, 4. ročník
Martin Tocik[2]
Študijný program: Technológia stavieb, 2. stupeň, 1. ročník

DETERMINATION OPTIMAL COMPOSITIONS FOR CONCRETE ON MIXED RECYCLED AGGREGATES

Abstract
The research presents determination of optimal composition for cement-concrete on mixed recycled aggregates of different fractions. For comparison of properties studied concretes were compared with concretes on natural aggregates and concretes on recycled aggregates with more simplified composition. Thus, for producing of prototype concretes were used next aggregates: river gravel (8 – 16 mm), recycled concrete aggregate (8 – 16 mm), mixed recycled aggregate of different fractions (0 – 4 mm, 4 – 8 mm, 8 – 16 mm), and quartz sand (0 – 4 mm). Concretes were tested for average density, compressive strength, flexural strength, water absorption and frost resistance. A comparison of the properties of concretes from different types of aggregates is carried out. As a result of research, the possibility and feasibility of producing concrete based on mixed recycled aggregates have been proven; using of mixed recycled aggregate of middle fraction can improve the mechanical properties of concretes. The developed concretes have high prospects to be used for road construction as a lower layer for multilayer cement-concrete rigid pavements.

Key Words
Recycled aggregates, mixed recycled aggregates, concrete, optimal composition, road concretes, rigid pavements.

1. Relevance and scientific novelty of the research topic

Selection of optimal composition is one of the most important steps for receiving concrete with high mechanical properties. In addition to chosen quality material, their ratio for better combination also must be observed. For production of high-performance concretes is recommended to use aggregates of minimum three different fractions [1], unlike conventional concrete, which requires only fine and coarse aggregates. The use of medium-sized aggregates (4–8 mm) contributes to the improved strength properties of concrete. This is primarily due to decreasing amount of fine aggregate, which influenced on volume of cement-sand matrix, which have lower strength comparing to aggregate itself. In addition, compaction of such concrete mixtures, during forming, are improving, which leads to reducing the number of voids in the concrete array. Within the conducted research, 3 fractions of aggregates of different types were used for production of optimal concretes, they properties were compered with reference one.

Considering high relevance of using secondary and recycled materials, prototype concretes were made from mixed recycled aggregates, including. The need to use recycled aggregates is explained by the large volumes of construction and demolition waste (**CDW**) generation in the world. In the

[1] Artem Chystiakov, MSc., Radlinského 2766/11, 81005, Stare Mesto, Bratislava.
[2] Martin Tocik, Bc., Radlinského 2766/11, 81005, Stare Mesto, Bratislava.

USA in 2018 600 million tons of construction and demolition waste were produced [2], in China in 2017 – 2360 million tons [3]. In European Union in 2014 – 337 million tons of CDW were generated [4], in 2016 – it was already 925 million tons [5], and the amount of newly formed demolition products increases annually [6]. There are several reasons why such a large amount of CDW is generating: dismantling of obsolete buildings massively erected in the last century; renovation of industrial districts; natural disasters like earthquakes, tsunami and fires; and military conflicts. Often, because of natural disasters and hostilities, dismantling of structures is always happening in chaotic way, as results demolition waste is formed with a highly heterogeneous composition with inclusions of plasters, aerated concrete, masonry and even organic. That waste is very difficult and expensive to sort and recycle to obtain homogeneous secondary material. In that case, optimal way is processing that remains into mixed recycled aggregates. Important requirement for mixed recycled aggregate is the absence of gypsum inclusions in its composition, since gypsum can cause corrosion of concrete made from this aggregate. In that case, before using mixed recycled aggregates fore concrete production, they must be test for gypsum content.

Concretes on mixed recycled aggregate are prospective to use for construction of lower layers of rigid pavements because of low strength requirements for such types of structures. At the same time, number of research show [7] that producing of concretes for bearing structures from that type of secondary raw material is impossible. According to normative documents STN 73 6102 [8], the concretes for lower layers of rigid pavements must have resistance to tensile flexural strength mainly 1.0 – 1.2 MPa, depending of the road class; and frost resistance grade F25 or F50, depending on climatic features, namely the average temperature of the coldest month of region of construction. Concretes on mixed recycled aggregates can presumably achieve this strength requirements.

The goal of this research aims on developing of optimal concrete compositions based on mixed recycled aggregates for construction lower layers of rigid road pavements; and improving of obtained concretes by composition modification with addition of aggregate of middle fraction (4 – 8 mm). The relevance of the study lies in using of low studied recycled raw material and developing of unique concrete compositions for lower layers of rigid pavements. The research results show that experimental concretes meet the requirements of regulatory documents for the construction of lower layers of rigid pavements, research confirms the possibility of using mixed recycled aggregates without a significant decreasing of mechanical characteristics of concrete, in comparison with the use of natural aggregates or homogeneous recycled concrete aggregates.

2. Materials used for research

For production of concretes within the experiment next materials were used:

- Portland cement CEM II/B-S 42.5 N (Cementaren Ladce, Slovakia). Brand of cement 500, it consists of up to 21 % of blast furnace slag.
- Polycarboxylate type superplasticizer additive Berament HT28 (Beton Racio, Slovakia) was used in amount of 1.2 % of cement mass, according to recommendation of manufacturer. Superplasticizer additive was used for increasing of workability of concrete mixtures without increasing w/c. The manufacturer of additive notes that the Berament HT28 is effective in increasing of workability of concrete mixtures, increasing of the self-compacting ability of mixture, which is especially important when working with concrete mixtures with low workability (S1 with cone slump 10 mm – 40 mm).
- Coarse, middle and fine aggregates of different types. Description and properties of aggregates are mentioned in Table 1. Images of aggregates are shown in Fig. 1.

Table 1: Characteristics of aggregates

	Type of aggregate	Fraction	Density, kg/m^3	Water adsorption, %	Fineness modulus
Coarse	River gravel	8 – 16 mm	1570	0.70 %	-
	Recycled concrete aggregate (**RCA**)		1260	5.94 %	-
	Mixed recycled aggregate (**MRA**)		1170	13.03 %	-
Middle	Mixed recycled aggregate of middle fraction (**MRA-m**)	4 – 8 mm	1360	14.55 %	-
Fine	Quartz sand	0 – 4 mm	1835	-	3.19
	Recycled concrete aggregate of fine fraction (**RCA-f**)		1500	-	3.53

Figure 1: Types of aggregate used in this research: a) river gravel, b) RCA, c) MRA, d) MRA-m, e) quartz sand, f) RCA-f

Mixed recycled aggregate is a specific row material because it has not a constant composition, the components can be differed depends on region of origin, type of demolished structure, technology of demolition and processing and other aspects. In the present research mixed recycled aggregate with

presented composition was used: 34.7 % of pure cement-sand matrix, 31.5 % of granite connected with cement-sand matrix, 23.9 % of pure granite, 8.9 % of bricks and ceramic tiles, 0.7 % of asphalt concrete, and 0.3 % of steel wire.

3. Methods of research

Within the research three prototype compositions of concretes on recycled aggregates and one composition of reference concrete on river gravel and quartz sand for comparison of results were developed. The compositions of all the studied concretes based on recycled and natural aggregates are shown in Table 2. Composition was selected by analytical and experimental method, using laboratory trail experiments. The proposed application of concretes is for construction of lower layers of rigid pavements. Taking into account that layers of concrete during construction of road surface are laid using concrete pavers, which can work with concrete mixtures with minimal workability S1, all the mixtures of concretes have workability class S1, and amounted to 20 – 30 mm of cone slump. Conciedering using aggregates with sufficiently different porosity and water absorption for concrete manufacturing, same workability of mixtures was provided by varying water/cement ratio (w/c).

Table 2: Compositions of the studied concretes

№	Cement (type, kg)	Coarse aggregate (type, kg)	Middle aggregate (type, kg)	Fine aggregate (type, kg)	Additive (type, kg)	Water (l)	w/c
1	CEM II/B-S 42.5 R, 300	river gravel, 1252	-	quartz, 760	Berament HT28, 3.6	124	0.41
2		RCA, 1070	-	RCA-f, 750		168	0.56
3		MRA, 1100	-	RCA-f, 750		190	0.63
4		MRA, 700	MRA-m, 485	RCA-f, 650		200	0.67

* the specified amount of material is given to produce 1 m^3 of concrete mixture

In frames of research, the mechanical properties of concrete were determined: average density, compressive strength and flexural tensile strength. The properties of concretes based on different types of coarse and fine aggregate were compared: on river gravel and quartz sand (1) as reference composition, on recycled concrete aggregate and recycled concrete aggregate of fine fraction (2), on mixed recycled aggregate and recycled concrete aggregate of fine fraction (3) and on mixed recycled aggregate of coarse and middle fraction and recycled concrete aggregate of fine fraction (4).

For the production of all types of concrete mixtures, mixing was carried out in a forced-type laboratory mixer. The workability of the concrete mixtures was determined with help of moisturized steel cone for determining the workability of the concrete mixture and for all mixtures it was 1 – 2 cm, which corresponds to the type of mixture workability S1. The research was conducted on concrete samples – cubes with dimensions of 100 × 100 ×100 mm and prisms with dimensions 100 × 100 × 400 mm. After de-moulding, the samples were gaining strength under normal conditions at a temperature of (20 ± 2) °C and a humidity of (95 ± 5) % in a special cabinet.

The *average density* of concretes in normal condition was determined by weighing and measuring of samples using Radwag PS 1000.R2 scales with a scale division of 0.01 g and a maximal load of 3000 g and callipers.

The concretes were tested for the *compressive strength* at the age of 28 days on samples with dimensions of 100 × 100 ×100 mm on a Controls MCC8 150/600/1000 press. The dimensions and density of samples were preliminarily determined. The equipment undergoes an annual accuracy check.

Testing of the concretes for *flexural tensile strength* on the 28th day was carried out on samples with dimensions of 100 × 100 × 400 mm on VEB Werkstoffprufmaschinen Leipzig 280 press. The dimensions and density of samples were preliminarily determined.

The determination of *frost resistance* of the concretes was carried out in accordance with STN 73 1322 [9] using accelerated method. Test was caried out in a 5 % sodium chloride solution at a temperature of freezing –50 °C and a thawing 20 °C in a climatic chamber BINDER Model MKF 720. The samples were previously water saturated with 5 % sodium chloride solution for 5 days.

4. Research results

Mechanical properties, namely average density, compressive strength and flexural tensile strength, of the investigated concretes were determined and presented in Table 3.

Table 3: Mechanical properties of the studied concretes

№	w/c	Average density, kg/m^3	Compressive strength on 28th day, MPa	Flexural tensile strength on 28th day, MPa
1	0.41	2430	48.0	3.61
2	0.56	2250	35.5	3.37
3	0.63	2190	33.4	3.15
4	0.67	2140	36.3	3.40

Based on table data, graphs of w/c and average density of concretes were formed and shown in Fig. 2 and Fig. 3 respectively. As can be observed from the graphs, the w/c ratio of concretes are directly depending on the type of aggregate used to make concrete. There is a dependence that concretes on a more porous aggregate require more water to ensure the same workability of the mixture – S1. Thus, the lowest w/c have concretes based on natural aggregates – river gravel and quartz sand. Concretes from more porous RCA and RCA-f have a higher w/c. Mixtures based on the most porous MRA and RCA-f with high water absorption have even higher w/c ratio. The highest w/c have concrete on MRA of coarse and middle fraction and RCA-f. The w/c ratio of concretes directly affected their average density in a proportional way. The concretes with a higher w/c ratio have a lower average density what is related to low density of aggregates itself and the appearance of micropores because of water evaporation.

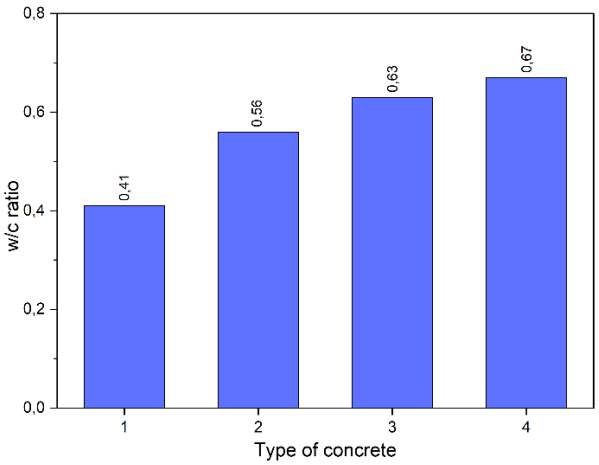


Figure 2: w/c of concretes

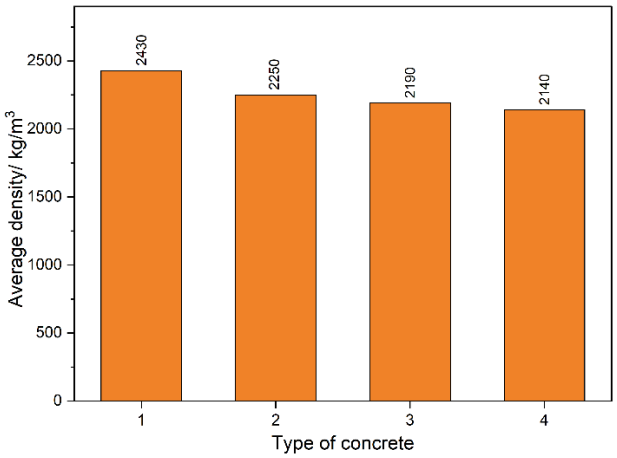


Figure 3: Average density of concretes

As can be seen from the data in Table 2 and graph in Fig. 4, the studied concretes have a sufficiently high compressive strength on the 28th day. Reference concrete composition on river gravel and quartz sand (1) has 48 MPa, concrete on RCA and RCA-f (2) has 35.5 MPa, which is 26 % lower than the strength of reference composition, but considering that this concrete was produced from only recycled aggregates the result is good. Relatively high strength indicator is explained by the wider, rougher and uneven surface of the recycled concrete aggregate compared to the smooth surface of river gravel, which ensures better adhesion of the cement-sand matrix with balances decreasing of strength because of using recycled concrete aggregate of fine fraction. Concrete on MRA and RCA-f (3) has a compressive strength of 33.4 MPa, which is only 6 % lower than the strength of concrete (2) with similar composition but on homogeneous recycled aggregates. This demonstrates the feasibility of using mixed recycled aggregates with a much lower price and high availability for the production of concrete with low strength requirements. The compressive strength of concrete on MRA of coarse and middle fraction and RCA-f (4), that is only on mass and cheap recycled aggregates but with advanced composition, is 36.3 MPa, which is 8 % higher than for concretes (3) on similar composition but without using of aggregates of middle fraction (MRA-m). This suggests the need for careful selection of the composition of concretes using recycled aggregates, potentially with lower strength, which will improve their performance.

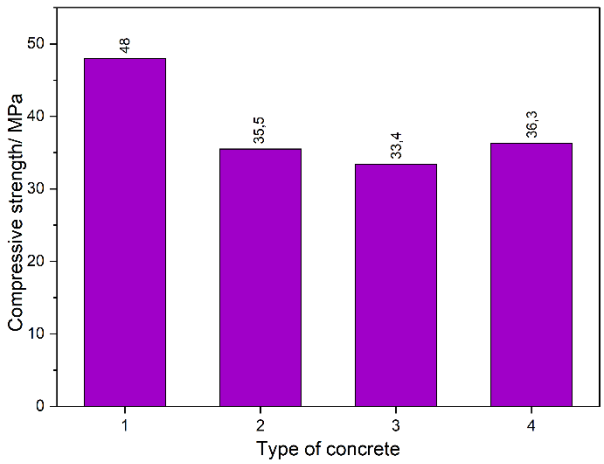


Figure 4: Compressive strength of concretes on 28th day

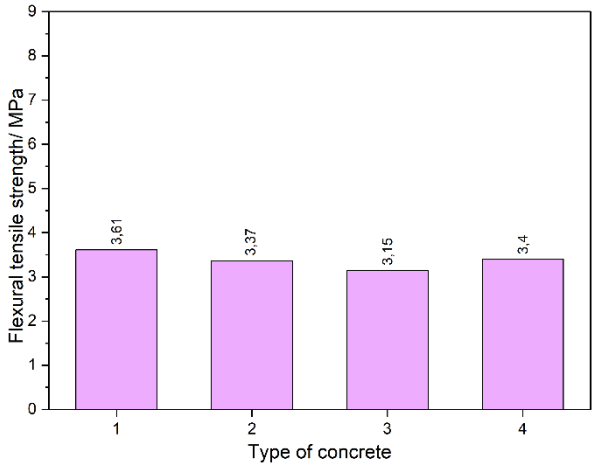


Figure 5: Flexural tensile strength of concretes on 28th day

Graphs in Fig. 5 showing flexural tensile strength. Studied concretes have similar dependencies for flexural tensile strength as for compressive strength – 3.61 MPa (1), 3.37 MPa (2), 3.15 MPa (3) and 3.40 MPa (4).

All compositions of concrete confirmed the frost resistance grade F100. It is important to note that all concretes were tested only for frost resistance grade F100 – 5 freeze-thaw cycles in a salt solution to meet the requirements of the standards for road concrete. In fact, concretes can have a higher frost resistance grade.

Considering that studied concretes is developing for construction of lower layers of rigid pavements, they must comply with the relevant standards. According to STN 73 6102 [8], concretes for lover layers of rigid pavements from cement concrete must have 1.0 – 1.2 MPa of resistance for flexural tensile strength and frost resistance grade F25 – F50 depending on class of road and climatic features of region. All developed concretes are complied with the requirements for concretes for lower layers of rigid pavements.

5. Conclusions

- Concretes based on different types of natural and recycled aggregates were developed and tested: on river gravel and quartz sand (1), on recycled concrete aggregate of coarse and fine fraction (2), on mixed recycled aggregate and recycled concrete aggregate of fine fraction (3), and on mixed recycled aggregate of coarse and fine fraction and recycled concrete aggregate of fine fraction (4).
- Compressive strength, flexural tensile strength, average density and frost resistance on the 28th day were determined.
- It was established that the strength and durability characteristics of studied concretes (1 – 4) comply with the standards STN 73 6102 [8] for the construction of lower layers of rigid pavements.
- Concretes based on mixed recycled aggregates had a sufficiently high strength. The strength of such concrete does not differ significantly from the strength of concretes based on recycled concrete aggregates with pure homogeneous composition. That proves the possibility of using such a type of aggregate for the production of a concrete for road construction without additional sorting and processing of mixed recycled aggregate.
- Compositions of concretes on recycled aggregates with tree fractions of fillers (coarse, middle and fine) showed better mechanical characteristics comparing to more simplified compositions. This showing the need for advanced selection of the composition of concretes on recycled aggregates, which will improve their properties.
- Based on the research results, it was established that the concretes had a fairly high strength and durability indicators, which allows to conclude that further tests on the use of concrete for the arrangement of the upper layers of rigid pavements are advisable. Namely, testing for higher grades of frost resistance, impact resistance and abrasion resistance. It is also expedient to test concretes based not only on recycled coarse-fraction aggregates, but also on fine fractions recycled aggregates in the future.

6. Acknowledgement

Research was funded by the EU NextGenerationEU through the Recovery and Resilience Plan for Slovakia under the project No. 09I03-03-V01-00141.

Literature

[1] Mariusz Wesolowski, Krzysztof Blacha and Pawel Iwanowski (2019), Analysis of Load Bearing Capacity of Cement Concrete Airfield Pavement's Construction in Relation to its' Changes of Physico-Mechanical Parameters. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 603, 052055,

[2] Environmental Protection Agency (2020), Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Fact Sheet Assessing Trends in Materials Generation and Management in the United States,.

[3] L. Zheng, H. Wu, H. Zhang, H. Duan, J. Wang, W. Jiang, B. Dong, G. Liu, J. Zuo, Q. Song (2017), Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China, Constr. Build. Mater., vol. 136, pp. 405 – 413.

[4] P. Villoria S´aez, M. Osmani (2019), A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union, J. Clean. Prod., vol. 241, 118400.

[5] EuropeanUnion (2019), WasteStat. Eur. Retrieved, 10 6, from Eurostat.

[6] R. V. Silva, J. de Brito, R. K Dhir (2019), Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications, Journal of Cleaner Production, issue 236, 177629.

[7] Chystiakov, A., Kroviakov, S., Bershadskyi, A., Medveď, I., Slaný, M. (2025), Sustainable Effect of Using Recycled Aggregates for Road Concrete Production. In: Sustainability in Energy and Buildings 2024. SEB 2024. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 113.

[8] STN 73 6102 Projektovanie ciest (Design of roads). Bratislava: Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo Slovenskej republiky, 2024.

[9] STN 73 1322. Stanovenie mrazuvzdornosti betónu. Bratislava: Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR, 2016.

Olena Shelvytska[1]
Študijný program: technológia stavieb, II. Ročník

POTENCIÁL MESTSKÉHO PROSTREDIA PRI DEKARBONIZÁCII

THE POTENTIAL OF THE URBAN ENVIRONMENT IN DECARBONIZATION

Abstract

The urban greenhouse effect intensifies global warming, accelerating heating and subsequently contributes to global climate change. According to 2022 report by the European Environment Agency, the buildings sector is a key contributor to greenhouse gas emissions in the EU, accounting for 34% of energy-related emissions [4]. In current practice, decarbonisation is the primary focus in technology, sectors and market. Potential progress of reducing CO_2 in cities is significantly beneficial for both the planet and humanity in the long-term perspective. Despite being a key objective, not all methods aimed towards a sustainable planet are efficient and flexible in civil engineering. This article explores the current state of CO_2 production by cities, decarbonisation and nature-based solutions in urban areas. In conclusion, the article aims to highlight the key objectives of global initiatives, outline a range of potential opportunities for urban decarbonisation, forming the basis for the dissertation research.

Kľúčové slová / Key Words
Dekarbonizácia miest; modernizácia budov; prírode blízke riešenia.
Urban decarbonization; retrofit; nature-based solutions.

1. Úvod

Stavebný sektor je producent 1/3 CO_2 a globálnym pôvodcom otepľovania. Dekarbonizácia je hlavný cieľ 21. storočia, relevantný pre rôzne sektory moderného trhu: uprednostňovať udržateľnosť, flexibilne, účinne metódy a techniky. Globálnou problematikou je zraniteľnosť voči zmene klímy, najmä pri otepľovaní a skleníkovom efekte.

Aktuálne, celkovo spotreba budov vytvára 28 % globálnych emisií CO_2 z každodennej energie [5]. Rast a výstavba miest, zvyšovanie spotreby energie a neudržateľné čerpanie prírodných zdrojov prispievajú k zvyšovaniu nárastu emisií. Cieľom dizertačnej prace je vypracovať návrhy ako možno prispieť k zvýšeniu odolnosti mesta a stavieb voči klimatickým zmenám s pomocou efektívneho fungovania inovatívnych prírode blízkych riešení.

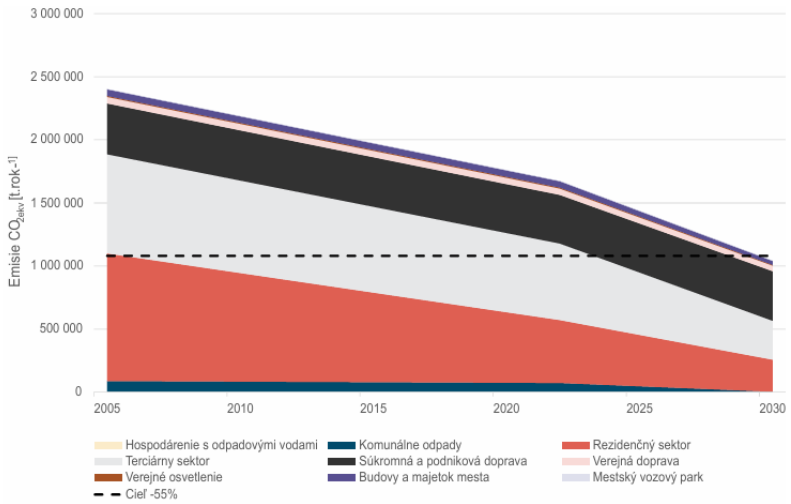
Účelom príspevku je preskúmať aktuálne riešenia na zníženie emisii CO_2 v urbánnom a stavebnom kontextoch. Energetickí efektívne riešenia sú príležitosťou pre rôzne skupiny inžinierov, urbanistov, ekológov či tvorcov politík. Časti príspevku analyzujú aktuálnu situáciu a udržateľné metódy riadenia, ktoré vedia podporiť štruktúru mesta a jeho tepelnú výkonnosti. Cieľom je prispieť ku zlepšeniu mestskej mikroklímy, osobitosti výstavby a jej okolia. Príspevok ukazuje potenciál dekarbonizácie v meste pomocou zníženia úrovne tepla, a to prostredníctvom implementácie prírode blízkych riešení.

[1] Olena Shelvytska, Ing. – Stavebná fakulta, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Aktuálna situácia

Mestské oblasti poskytujú priestor pre 56 % svetovej populácie, čím spotrebujú viac ako dve tretiny svetovej energie a dnes produkujú približne 70 % globálnych emisií uhlíka [6]. V roku 2021 bol sektor stavebníctva zodpovedný za približne 2 335 Gg CO_2 (2 335 000 ton). Rok 2019 je najlepší vzorový ukazovateľ za posledné roky (aj emisie roku 2005): cca 2 300 ± 100 Gg CO_2 (vlastné spracovanie).

Základným cieľom je dekarbonizácia mestského prostredia – znižovanie emisií skleníkových plynov a prechod na nízkouhlíkový model fungovania je jednou zo zásadných priorít Európskej únie, ako aj globálnych klimatických stratégií, spomína Medzivládny panel pre zmenu klímy (IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change). Sektor budov má za cieľ do roku 2030 znížiť emisie oxidu uhličitého o 12 % v porovnaní s referenčným priemerom rokov 2018, 2019 a 2020. Predpokladaný vývoj emisií CO_2 je zobrazený na obrázku 1. Aj Slovenská republika postupuje v kontexte Agendy 2030 Organizácie Spojených národov pre udržateľný rozvoj, ku ktorej sa prihlásila v roku 2016. Podľa Medzinárodnej agentúry pre energiu (IEA) potenciálne príležitosti na dekarbonizáciu do roku 2050 pri dosiahnutí nulových čistých emisií zahŕňajú takmer 85 % budov [2].

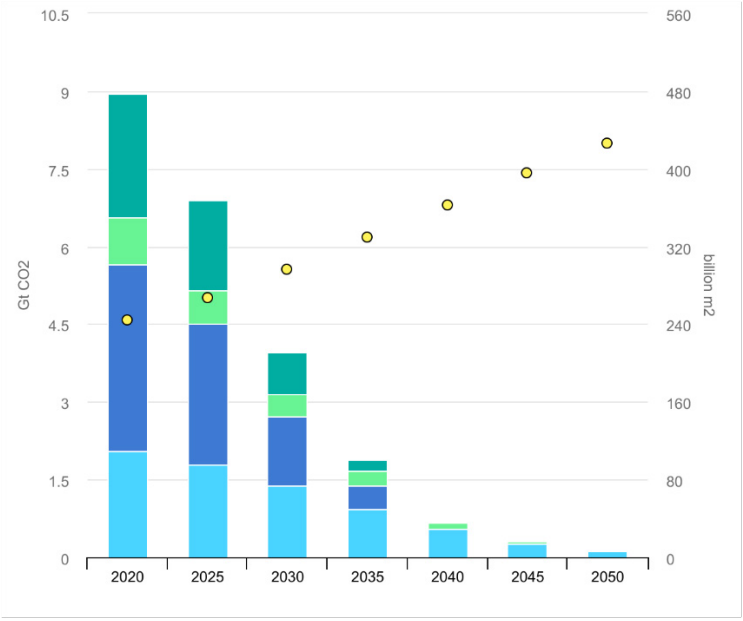


Obrázok 1: Predpokladaný vývoj emisií skleníkových plynov do 2030 (Zdroj: SECAP, 2024)

Environmentálna politika EÚ sa vyvíja už viac ako 40 rokov a pozostáva z viac ako 350 právnych dokumentov pre dynamicky proces neustáleho vývoja oblasti [3]. Ak chceme dosiahnuť ciele Parížskej dohody znižovanie emisií z budov je rozhodujúce a patrí k prvým bodom, ktoré je možné dosiahnuť v roku 2030. Parížska dohoda, ktorá bola prijatá 196 stranami v roku 2015, má za cieľ obmedziť globálne otepľovanie na úroveň výrazne nižšiu ako 2 °C, najlepšie na 1,5 °C, v porovnaní s predindustriálnymi úrovňami, do roku 2030 [1, s. 65].

K septembru 2022 bola miera rekonštrukcie existujúcich budov približne iba 1 % a je potrebné ju minimálne zdvojnásobiť. Iba 5 % nových budov bolo pripravených na nulové emisie uhlíka [7]. Podľa IEA kľúčovým míľnikom transformácie globálneho stavebného sektora podľa plánu (obr. 2) je, aby všetky nové a rekonštruované budovy (angl. „Retrofit“) dosiahli úroveň pripravenosti na nulové emisie uhlíka do roku 2030. Obr. 2 ukazuje predpokladaný postupný pokles emisií CO_2 od roku 2020 do roku 2050. Benefitom pripravenosti budovy na nulové emisie uhlíka je vysoko energeticky účinná a buď priamo využíva obnoviteľnú energia, alebo využívanie energetického zásobovania (napríklad elektrina alebo diaľkové vykurovanie), ktoré bude do roku 2050 úplne dekarbonizované. To si vyžaduje, aby budovy spĺňali kritériá týkajúce sa energetickej účinnosti: používania nízko emisného paliva, sledovania, zaznamenávania a hlásenia emisií CO_2 na základe životného cyklu, integrácie s

elektrizačnými systémami využívajúcimi vysoký podiel variabilných obnoviteľných zdrojov a odolnosti voči meniacej sa klíme [7].



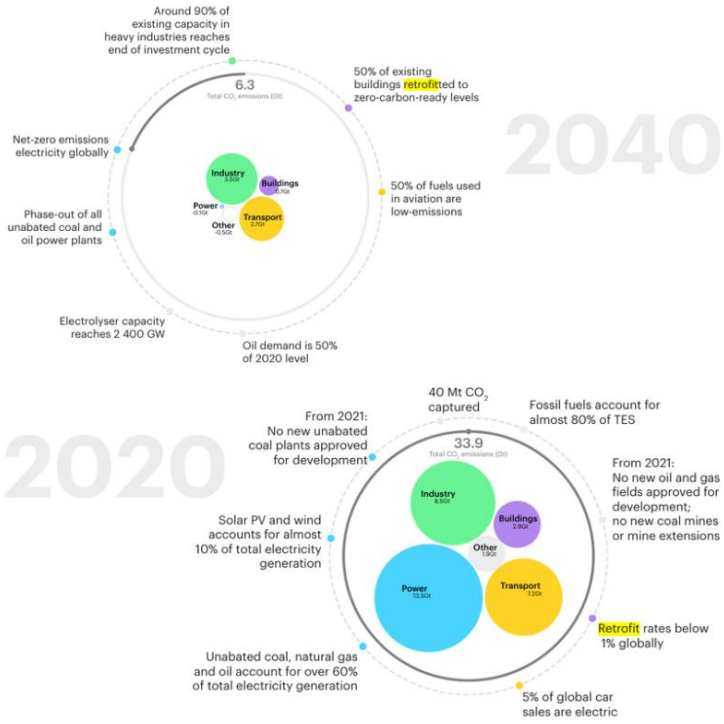
Obrázok 2: Emisie CO_2 a podlahová plocha globálneho sektora budov v scenári nulových čistých emisií, 2020 – 2050 (Zdroj: IEA, 2025)

Z hľadiska stavebníctva v mestskom prostredí, podľa IAE, je modernizácia existujúcich budov obzvlášť náročná vzhľadom na dlhú životnosť stavieb. V skutočnosti približne dve tretiny celkovej podlahovej plochy existujúcich budov na svete sa budú používať aj v roku 2040. Zatiaľ cieľom „Retrofit“ je zmodernizovať 20 % existujúceho stavebného fondu na úroveň pripravenú na nulové emisie uhlíka, čím sa zvýši miera renovácií na najmenej 2 % do roku 2030, v porovnaní s menej ako 1 % v súčasnosti [7]. Dnešné technológie sú teoreticky schopné zabezpečiť takmer všetky potrebné redukcie emisií do roku 2030 v scenári „Net Zero Emmision“ (NZE). Avšak výhodná implementácia je možná najmä s možnosťami rozsiahlej transformácie, ktoré pre globálny sektor zahŕňajú zvýšenú dostupnosť a cenovú prijateľnosť a efektívnych technológií pre budovy.

IAE scenár nulových emisii každých 5/10 rokov zahŕňa nasledujúce ciele (obr. 3), ktoré sa týkajú modernizácie a prestavby (ďalej retrofitu) mestských budov, aby boli efektívnejšie, komfortnejšie a spĺňali súčasné štandardy (tab. 1):

Tabuľka 1 – *Plán cesty pre globálny energetický sektor: ciele sektora budov 2020 – 2050 (spracovane podľa IAE NZE, 2025)*

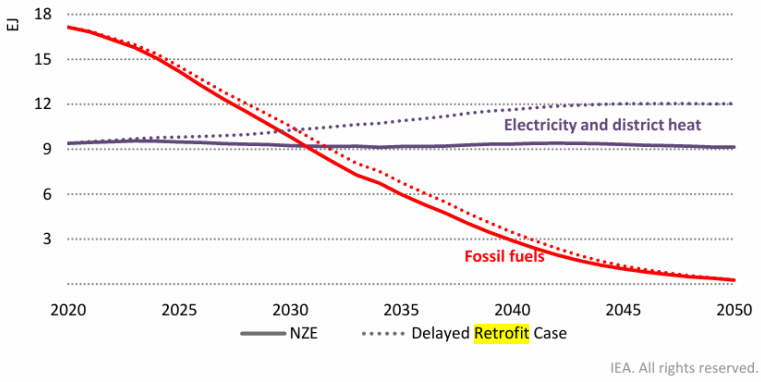
Rok	**Cieľ**
2020	Miera modernizácie je celosvetovo nižšia ako 1 %.
2030	Všetky nové budovy sú pripravené na nulové emisie uhlíka.
2035	Väčšina predávaných spotrebičov a chladiacich systémov je najvyššej kvality vo svojej triede.
2040	Významný bod zo všetkých pre odvetvie stavebníctva - 50 % existujúcich budov prejde retrofitom na úroveň pripravenú na nulové emisie uhlíka.
2050	Viac ako 85 % budov je pripravených na nulové emisie uhlíka.



Obrázok 3: Interaktívna mapa cieľa nulových emisií do roku 2050: podanie relevantných vizualizácií 2020 a 2040 (Zdroj: IEA, iea.li/nzeroadmap, 2025)

Modelovanie naznačuje, že desaťročné oneskorenie v zrýchlení modernizácie by zvýšilo energetickú náročnosť vykurovania obytných priestorov o 25 % a náročnosť na chladenie priestorov o viac ako 20 %, čo by v roku 2050 v porovnaní s NZE znamenalo 20 % nárast dopytu po elektrine (obr. 4).

V prípade, že nedôjde k žiadnym zmenám, zvýši sa tlak na energetický sektor, ktorý bude musieť nainštalovať väčšie kapacity na výrobu elektriny s nízkym obsahom uhlíka. V dôsledku meškania v zvyšovaní miery a rozsahu renovácií by bolo takmer nemožné dohnať požadované ciele, čo by ďalej zaťažovalo sektor energetiky a zvyšovalo dopyt po fosílnych palivách. Dosiahnutie požadovaného tempa a rozsahu renovácií v nadchádzajúcich rokoch je najväčšou výzvou, ktorej čelí sektor budov (spracovane podľa IEA, 2025).



Obrázok 4: Celosvetová spotreba energie na vykurovanie a chladenie obytných priestorov v prípade NZE a oneskoreného retrofitu (IEA, iea.li/nzeroadmap, 2025)

3. Metódy riešenia

Kľúčová otázka stavebníctva pre vízie nulových emisii nasledujúcich rokov je: ktoré „retrofit“, čisté a flexibilné varianty môžu najviac produktívne prispieť do cieľa nulových emisii? Metódy na ochladzovanie miest a obmedzovanie dopadov vĺn horúčav nemusia obsahovať len rekonštrukciu budov. Riešenia založené na prírode (angl. Nature Based Solutions - NBS) vedia zlepšiť vnútorné aj vonkajšie tepelné prostredie a znížiť spotrebu energie.

Prírode blízke riešenia sú opatrenia na ochranu, zachovanie, obnovu a udržateľné využívanie a spravovanie ekosystémov s cieľom podporiť úsilie o adaptáciu na zmenu klímy a jej zmierňovanie, zachovať biodiverzitu a umožniť udržateľné obživy [1]. Riešenia založené na prírode sa považujú za výhodné pre ľudí aj prírodu, pretože riešia viacero problémov naraz.

Samotná rekonštrukcia teoreticky nemusí znamenať celkovú prestavbu budovy, ale mala by sa zamerať na hlavné časti, ako sú strechy alebo steny. V nasledujúcej tabuľke 2 sú spracované hlavné možnosti NBS spolu s ich výhodami a nevýhodami, podľa IFC na rok 2024. Je dôležité uviesť, že metódy NBS nemusia byť nevyhnutne obmedzené len na vnútorné prostredie budovy, ale aj na jej okolie a mestskú oblasť, čo poskytuje viac možností na riadenie vykurovania.

Tabuľka 2: *NBS na znižovanie otepľovania v meste (IFC, 2024)*

NBS riešenie	Popis účinku	Výhody	Obmedzenia
Zelené strechy / fasády	Pomáha ochladzovať budovu, znižuje vyžiarenie tepla do okolia, a tým prispieva aj k zníženiu teploty v uliciach.	Zlepšuje energetickú efektívnosť budov, priaznivé efekty pre obyvateľov. Vhodné pre husté mestské prostredie s obmedzeným priestorom na zemi.	Vyššie počiatočné náklady, technické nároky (nosnosť strechy, izolácia). Údržba vegetácie, potreba zavlažovania v suchých obdobiach.
Bioretencia / zelená infraštruktúra (napr. priepustné povrchy)	Znižujú povrchové zahrievanie tým, že nahradzujú tmavé, nepriľnavé povrchy vegetáciou a vodou, čo znižuje teplotu okolia	Multifunkčný prínos: zadržanie vody, zlepšenie mikroklímy, estetika. Môže byť integrované v nových projektoch.	Náklady a technické riešenie môžu byť vyššie než bežné šedé infraštruktúry. Vyžaduje údržbu a vhodné plánovanie.
Zelené koridory / stromoradia	Zvyšovanie stromových plôch v kontinuálnych pásmach (napr. ulice, železničné koridory) umožňuje tienenie a únik tepla	Môže prepojiť zelené plochy a zlepšiť prúdenie vzduchu. Relatívne efektívne vo vybraných miestach (ulice, chodníky)	Vyžaduje koordinačné plánovanie so zástavbou a infraštruktúrou. Výsadba a rast stromov trvá – okamžité efekty sú menej výrazné.
Otvorené zelené priestory (parky, záhrady)	Zvlhčovanie prostredia, tienenie, nižšia akumulácia tepla v zastavanom prostredí.	Relatívne jednoduché implementovať v rámci urbanizmu. Zlepšenie rekreačných možností, zdravia obyvateľov	V intenzívne zastavaných oblastiach môže byť problém s nachádzaním vhodných plôch. Údržba, potreba zavlažovania pri suchu
Urbánne lesy / stromy v meste	Zvyšujú tienenie, podporujú evapotranspiráciu, tým dochádza k ochladeniu vzduchu a povrchov.	Zlepšenie mikroklímy, zníženie teploty v meste. Zlepšenie kvality vzduchu, biodiverzity, estetika.	Potrebujú priestor, súčasťou môže byť vysoká počiatočná výsadba a potom údržba. Efekt môže byť v čase a závisí na rozlohe a druhu stromov

Pomocou vyššie uvedených metód sa zvyšuje povedomie o projektoch založených na prírode v obciach a súkromnom sektore, ktoré sa zameriavajú na zvyšovanie odolnosti miest pri riešení efektu mestského tepelného ostrova, záplav, sucha, znečistenia vody a ovzdušia a ďalších problémov.

Také riešenia sú výhodne tým že majú nižšie investičné a prevádzkové náklady na údržbu infraštruktúrnych služieb; výrazne nižšiu uhlíkovú stopu v porovnaní s konvenčnými alternatívami; odolnosť infraštruktúry; vyššiu rozmanitosť zelene v meste a účinnejšie ekosystémové služby. Prinášajú aj vytváranie pracovných miest a ekonomických príležitostí pre miestne komunity, vzdelávacie príležitosti, zlepšenie ľudského zdravia a zvýšenie vodnej bezpečnosti.

Hlavnými možnými bariérami sú špecifikácie pre lokalitu, čo bráni rozvoju univerzálnych návrhových smerníc a šablón; špecializované znalosti, ktoré vyžadujú inžiniersku expertízu pri navrhovaní a prevádzke; možné adaptívne riadenie výkonu a monitorovanie výkonnosti na doplnenie dlhodobej prevádzky a údržby. Niektoré NBS si vyžadujú veľké územné plochy na realizáciu (spracovane podľa IFC, 2024 [8]).

4. Závery

Viac ako polovica svetovej populácie žije v mestských oblastiach, pričom sa očakáva, že tento počet do roku 2050 vzrastie na 70 %. Mestská infraštruktúra zohráva kľúčovú úlohu pri znižovaní globálnych emisií skleníkových plynov. Úlohou dnešnej doby nie je len propagácia problému alebo snaha pôsobiť viac ekologicky, ale rozumný prístup k problému. Hlavnou metódou znižovania CO_2 v meste je modernizácia budov – retrofit, podľa globálneho plánu Net Zero do roku 2050. Článok oboznamuje s možnými riešeniami, ktoré budú účinné a výhodné, čím poskytuje informácie pre ďalší rozvoj výskumu.

Ochladzujúci účinok mestských oblastí pomáha znižovať emisie CO_2 a predchádzať ekologickému kolapsu. Môže taktiež zlepšiť metódy absorpcie tepla a klimatizácie budov a ich okolia, čo je relevantné pre rôzne sektory, nielen pre stavebníctvo. Rozvinutá mestská infraštruktúra môže ovplyvniť nielen plánovanie budúcej udržateľnosti, ale môže mať dopad aj na samotnú kvalitu života, vrátane energetického potenciálu miestnych zdrojov, ekonomických a sociálnych výhod, finančnej stability, tvorby pracovných miest a zdravia. Skúmanie témy otvára možné príležitosti pre rôzne implementačné metodiky, ako napríklad spoluprácu aktérov, alebo dokonca možné prieskumy rôznych skupín obyvateľstva.

Ak sú procesy urbanizácie – vrátane plánovania výstavby, infraštruktúry a používania materiálov – orientované na princípy udržateľnosti, energetickej účinnosti a nízkouhlíkového hospodárenia, mestá sa môžu stať kľúčovými aktérmi v procese globálnej dekarbonizácie.

Príspevok je súčasťou dizertačného výskumu, podporovaný projektom VEGA 2/0018/25 – Prírode blízke riešenia v integrovanom manažmente lesa a mestskej zelene.

Literatúra

[1] UNDP. The Climate Dictionary. New York: United Nations Development Programme, 2023. 30 s. [online]. Dostupné na: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2023-10/undp-the-climate-dictionary-v3.pdf

[2] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. Paris: IEA, 2021. [online]. [Dostupné na:

https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf

[3] PRÁZNOVSKÁ, M.: Environmentálna politika Európskej únie – legislatíva, výzvy a prax. In: PUBLICY 2020 I. – 30 rokov verejnej správy. Zborník príspevkov z medzinárodnej vedeckej konferencie. Vyd. 1. Bratislava: Univerzita Pavla Jozefa Šafárika, 2020, s. 227–236. ISBN 978-80-572-0089-5.

[4] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA). Greenhouse gas emissions from energy use in buildings in Europe. Copenhagen: EEA, 2024. [online]. Dostupné na: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-energy

[5] DANFOSS: Roadmap for Decarbonizing Cities. Danfoss White Paper, Impact, Issue no. 3. Kolding: Danfoss, 2023. 20s. [online]. Dostupné na: https://cdn.sanity.io/files/5zabm86v/production/0397994639d425772172c5dec4f83180a9095ad4.pdf

[6] WANG, Y., WANG, Z., RAHMATOLLAHI, N., HOU, H.: The impact of roof systems on cooling and building energy efficiency. Applied Energy. 2024, vol. 376, s. 124339. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.124339. [online]. Dostupné na: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261924017227

[7] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA): Technology and Innovation Pathways for Zero-Carbon-Ready Buildings by 2030. Paris : IEA, 2022. [online]. Dostupné na: https://www.iea.org/reports/technology-and-innovation-pathways-for-zero-carbon-ready-buildings-by-2030

[8] Nature-based solutions in cities: Solutions and examples for municipalities and the private sector. Washington, DC: Global Facility for Disaster Reduction and Recovery & International Finance Corporation, 2024. [online]. Dostupné na: https://www.ifc.org/content/dam/ifc/doc/2024/nbs-for-cities-solutions-and-examples-for-municipalities-and-private-sector.pdf

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

ODHAD STAVEBNÉHO ODPADU V NOVOSTAVBÁCH POMOCOU WGR BENCHMARKU A STROJOVÉHO UČENIA

Estimating Construction Waste in New Buildings Using a Waste Generation Rate Benchmark and Machine Learning

Abstract
The paper presents a project-specific methodology for estimating construction and demolition (C&D) waste for new buildings in the Slovak context. It critically assesses the limits of traditional coefficient-based approaches and proposes a two-step framework. This framework includes a reference estimate using the median Waste Generation Rate (WGR) from historical projects and a core Random Forest machine-learning model. The model predicts total waste (or WGR) from readily available building features like gross floor area, number of storeys, total height, structural system, project costs, and prefabrication rate. The methodology emphasizes robust data preparation (normalization, one-hot encoding, outlier filtering) and conservative model tuning for generalizability with small datasets. The output is a more accurate, interpretable estimate, benchmarked against a baseline, with identification of key waste drivers. It is applicable to capacity planning, budgeting, and preliminary auditing. The framework supports ongoing recalibration and comparability with international projects, thereby fostering circular-economy goals in construction.

Kľúčové slová / Key Words
stavebný a demolačný odpad, novostavby, Waste Generation Rate, projektovo-špecifický mikro model, Random Forest

1. Úvod

Ochrana životného prostredia je dôležitou súčasťou stavebného procesu. Stavebníctvo spotrebováva 40% celosvetovej energie, 16% celkovej spotreby vody a má podiel viac ako 30 % na celkovom množstve odpadu vyprodukovanom svetovo[1] [2]. Zníženie produkcie stavebného odpadu (CW) a jeho odklonenie od skládok či opätovné použitie sú kľúčové pre podporu cirkulárnej ekonomiky. Presná predpoveď druhu a množstva odpadu vznikajúceho počas výstavby je pre dosiahnutie týchto cieľov nevyhnutná.

V súčasnosti sa odhady stavebného odpadu na Slovensku robia na základe skúseností spracovateľov dokumentácie, avšak tieto odhady bývajú nepresné. Odhad môže viesť prekročeniu nákladov v stavebných projektov približne o 21-30 % [1]. Cieľom článku je identifikovať používané odhady, zdôrazniť ich slabé stránky a predstaviť vlastný prístup k odhadu stavebného odpadu.

2. Typológia stavebného odpadu podľa typu procesu a úrovne modelu

Vznik stavebného odpadu môžeme rozdeliť podľa procesných typov stavebných projektov a to na novostavby, budovy určené na rekonštrukciu a budovy určené na demoláciu. Každý typ stavebného zásahu (novostavba, rekonštrukcia, demolácia) vytvára odlišný podiel aj skladbu stavebného odpadu, a preto si vyžaduje iný spôsob jeho odhadu. Modely na odhad stavebného odpadu rozlišujeme na projektovo-špecifické a systémové (mestské/regionálne). V navrhovanom prístupe sa sústredíme najmä na novostavby a na projektovo-špecifické modely, pre komplexnosť problému však uvádzame aj prístupy využívané pri rekonštrukciách, demolačných projektoch a v systémovom (mestskom/regionálnom) rámci. Toto rozlíšenie je dôležité, keďže prenášanie koeficientov medzi týmito úrovňami vedie k skresleniam.

3. Prehľad modelov odhadu stavebného odpadu (CW): projektovo-špecifické a systémové prístupy

Makro modely (alebo všeobecné modely) sa primárne zameriavajú na odhad celkového množstva odpadu na vyššej geografickej alebo administratívnej úrovni (mesto, región, krajina) [2]. Tieto modely sú kľúčové pre strategické plánovanie odpadového hospodárstva, ako je napríklad určenie poplatkov za znečistenie, dotácií pre recyklátorov, alebo plánovanie kapacity skládok. Medzi makro prístupy patria metódy založené na celkovej miere generovania odpadu (GRC), ktoré používajú makroúrovňové premenné (napr. rast populácie, HDP, počet stavebných povolení) [3]. Historicky sa tiež využívali modely časových radov (napr. ARIMA, GM), ktoré sú vhodné pre krátkodobé až strednodobé predpovede. Novšie prístupy, ako napríklad Analýza toku materiálu (MFA), ponúkajú komplexnejšie a interpretovateľné nástroje na sledovanie materiálu v čase a priestore, čím prekonávajú obmedzenia „black-box“ modelov strojového učenia, hoci si vyžadujú podrobné informácie o životnosti budov a intenzite využitia materiálu[4].

Tieto modely sa líšia v tom, ako dokážu spracovať komplexné interakcie premenných štatistické metódy často predpokladajú lineárne vzťahy, zatiaľ čo metódy ako GM a niektoré modely strojového učenia (ML) sú silné v prispôsobovaní sa dátam a v predikčnej presnosti, no často na úkor interpretovateľnosti[4].

Tab. 1 – Systémové makro modely ich princíp, vstupné údaje, nevýhody

Model/Metóda	**Princíp Fungovania**	**Vstupné Údaje**	**Nevýhody**
Generovanie sadzby (GRC)	Stavebný odpad odhadujeme ako súčin zakúpeného materiálu **M** a koeficientu odpadu $\mathbf{c_v}$ ($\mathbf{CW = M \times c_v}$, koeficient môže vychádzať z externých zdrojov), alternatívne, podľa rozsahu aktivity, používame mieru generovania odpadu na jednotku plochy **A** ($\mathbf{CW = A \times WGR}$) [3] [5].	Makro-úrovňové premenné, ako sú: rast populácie, finančná hodnota stavebných povolení, stavebná činnosť a regionálna plocha.	Nie sú aplikovateľné na rôzne typy stavebných projektov, obmedzené na regióny s podobnými stavebnými technikami. Tieto modely sú kontextovo závislé a vyžadujú neustálu aktualizáciu[2] [5].
Analýza toku materiálu (MFA)	Kvantifikuje prítok, odbyt a akumuláciu materiálov na základe princípov masovej bilancie, sledujúc dynamické zmeny toku materiálov[4].	Makro-socioekonomické faktory (populácia, HDP), podrobné technické parametre (životnosť budov a intenzita využitia materiálov).	Môže čeliť obmedzeniam v presnosti dát a integrácii. Dlhšia predpoveď je ovplyvnená zmenami politík, územným plánovaním a technologickým pokrokom[4].
Grey Model (GM)	Využíva teóriu šedého systému na odhadovanie budúcich trendov s využitím existujúcich časových radov. Je vhodný pre systémy, kde je informácia len čiastočne známa[6]. Model GM(1,1) sa používa pre vysokú presnosť predikcie[5].	Vyžaduje len malý súbor dát, dokonca aj neúplné časové rady. Socio-ekonomické indikátory, stavebné štatistiky (napr. HDP, populácia, podlahová plocha).	Zlá interpretovateľnosť (funguje ako „black box“). [5] Presnosť predpovede môže výrazne klesať s rastúcim predikčným horizontom[6].
Autoregresný integrovaný model kĺzavého priemeru (ARIMA)	Model časových radov, ktorý kombinuje autoregresné a kĺzavé priemerové zložky na predpovedanie budúcich trendov na základe historických dát[1] [6].	Časové rady (historické dáta o produkcii odpadu (štatistiky). Vyžaduje dostatočne stabilné tréningové dáta a časové rady s jasnými vzormi.	Predpokladá (kvázi)lineárne vzťahy je obmedzený na spracovanie časovo premenlivých dát[1] [6]. Citlivý na zlomy (politiky, cykly) a outliery; vhodný skôr pre krátke až stredné horizonty[6].
Umelá neurónová sieť (ANN)	Silná technika strojového učenia, schopná modelovať komplexné nelineárne vzťahy medzi vstupmi a výstupmi[5]. Používa sa aj na predikciu na regionálnej úrovni[5].	Historické dáta o predošlej produkcii odpadu, socio-ekonomické dáta, faktory urbanizácie a spotreby energie.	Slabá interpretovateľnosť („black-box“)[5]. Trpí na vznik rizika preučenia (overfitting).

Mikro modely (alebo projektovo-špecifické modely) sú zamerané na presné kvantifikovanie a odhadovanie odpadu generovaného počas jednotlivých fáz konkrétnych projektov (výstavba, renovácia, demolácia)[2]. Presný odhad na úrovni projektu je nevyhnutný pre efektívny manažment

odpadu, audit pred renováciou (PRA) a pre návrh stratégie znižovania odpadu (napr. BIM-based „Designing-out-waste“)[7].

Tradičné mikro metódy zahŕňajú priamu kvantifikáciu na mieste (SV), ktorá je časovo náročná, alebo prístupy založené na koeficientoch, ktoré spájajú množstvo odpadu s indikátormi rozsahu projektu (napr. celková podlahová plocha alebo náklady). Tieto metódy majú často problémy s určením presných koeficientov, ktoré sa líšia v závislosti od typu budovy, veku a typu práce[7]. Moderné prístupy na úrovni projektu využívajú digitálne technológie ako BIM, ktoré umožňujú automatizovaný výpočet potrebného množstva materiálov a na základe toho odhadujú odpad[3]. Ďalšou takouto technológiou je strojové učenie (ML), ktoré sa používa aj pri makro modeloch v tomto prípade najmä však regresné modely (napr. Ensemble Tree Regression, Random Forest, SVMR) sú využívané na predpovedanie projektovo-špecifickej hmotnosti odpadu z renovácie[1] [7].Tieto modely čerpajú dáta o projekte (napr. náklady, typ práce, vek budovy, výška) a ponúkajú vyššiu spoľahlivosť ako jednoduché koeficientové metódy[7].

Tab. 2 – projektovo špecifické mikro modely ich princíp, vstupné údaje, nevýhody

Model/Metóda	**Princíp Fungovania**	**Vstupné Údaje**	**Nevýhody**
Hmotnosť na jednotku podlahovej plochy/nákladov	Odhaduje odpad vynásobením indikátora rozsahu projektu (podlahová plocha alebo náklady) koeficientom tvorby odpadu[7].	Renovovaná podlahová plocha (m²), celkové náklady na renováciu (USD, €).	Vysoko citlivé na presné určenie prechodových koeficientov, často sa zameriava len na vybrané typy prác alebo budov[7].
Skutočná kvantifikácia na mieste (SV)	Priame meranie hmotnosti alebo objemu odpadu triedením a vážením, alebo nepriame meranie s využitím prepravných lístkov na odvoz odpadu[2].	Údaje zozbierané na stavenisku (váženie, triedenie odpadu), zvozové evidencie.	Nákladné a časovo náročné, vyžaduje vysoký stupeň personálnej a strojovej podpory, poskytuje len približné dáta[2].
BIM-založené odhady	Využíva modely BIM na automatické a rýchle získavanie skutočných kvantitatívnych dát o projektoch, odhad CW často vychádza z rozdielu medzi nakúpenými a zabudovanými materiálmi[3].	BIM model (pre extrakciu množstiev materiálov), záznamy o nákupoch, záznamy dodávateľa o odvoze.	Niektoré prístupy sú závislé od predpokladaných sadzieb generovania odpadu pre každý typ prvku, porovnanie nemusí odrážať realitu. Vyžaduje kvalitný a aktuálny BIM[3].
Strojové učenie (ML) – Regresné/Ensemble modely	Konštruuje zovšeobecniteľný model, ktorý predpovedá výstupy (množstvo odpadu) na základe vybraných vstupných charakteristík projektu[7].	Projektové vlastnosti: typ renovačnej práce, náklady, typ budovy, rok výstavby, výška, podlažnosť, plocha, počet renovovaných podlaží.	Problém generalizácie na rôzne regióny kvôli rozdielom v stavebných postupoch[7]. Modely môžu byť ťažko interpretovateľné („black box“)[5]. Vyžaduje sa dostatok dát na trénovanie[1].
Materiálovo-zásobový (Material stock-based) – pri renováciách	Odhaduje množstvá materiálov počas životného cyklu budovy na základe zásob materiálov a pravdepodobnosti životností[7].	Odhadované materiálové zásoby v budovách (byty), rozdelenie životností materiálov.	Zvyčajne sa zameriava na kvantifikáciu odpadov z výmen bytových prvkov[7].

4. Metodika projektovo-špecifického (mikro) modelu na odhad C&D odpadu pre novostavby na Slovensku

Projektové dáta z už realizovaných projektov predstavujú kľúčový zdroj poznatkov pre riadenie nákladov aj toku stavebného odpadu. Systematická analýza ukazovateľov z realizovaných projektov umožňuje identifikovať opakujúce sa vzorce a prijímať informované rozhodnutia v rozpočtovej príprave aj pri realizácii. Pri vhodnej štruktúre sa tieto záznamy menia na porovnávacie benchmarky, prípadne metodické šablóny, ktoré štandardizujú pracovné postupy a citeľne spresňujú budúce odhady. Efektívne využitie dát však predpokladá zavedenie konzistentných systémov a jednotných štandardov zberu, uchovávania a extrakcie relevantných informácií.

Hrubá podlahová plocha (Gross Floor Area, GFA) alebo plocha zásahu predstavuje univerzálny a najzákladnejší kvantitatívny prediktor pre odhad generovania CDW, široko používaný v medzinárodnej praxi. Táto premenná slúži na výpočet štandardizovanej jednotkovej miery generovania odpadu (Waste Generation Rate, WGR), zvyčajne vyjadrenej v alebo zastavanej plochy[1]. Historické projektové dáta sa štandardizujú pomocou WGR, čo umožňuje základné porovnávanie projektov. Odhad CDW založený na ploche (CDW Pa) sa môže pre počiatočné, robustné odhady vypočítať pomocou mediánovej hodnoty WGR získanej z podobných projektov

$$\text{CDW Pa}(t) = \text{Medián } (t\ m^{-2}) \text{x Plocha záberu } (m^2) \quad (1)$$

Tento jednoduchý model je obzvlášť užitočný v prostredí, kde sú štatistiky o historickom odpade obmedzené, a umožňuje rýchle počiatočné odhady[1] [8].

Kľúčovým nedostatkom je, že GFA neobsahuje informácie o kritických parametroch, ktoré definujú typ odpadu, ako sú typ konštrukcie, materiál stien, účel budovy alebo trvanie projektu. Aby sa predišlo skresleniu, metodika sa v počiatočnej fáze zameriava na materiálovo alokované prúdy relevantné pre nové budovy (najmä betón, murivo/tehly, sadrokartón, kovy, drevo) a explicitne oddeľuje zeminy a výkopové materiály, ktoré v makroštatistikách dominujú, no na úrovni riadenia stavby zvyknú mať osobitný režim. Pre novostavby patrí medzi najväčšie prúdy betón a sadrokartón, tieto materiály sa bežne kvantifikujú priamo z projektu/BIM a potvrdzuje sa ich význam v projektovej praxi[3].

Ako súbor špecifických vstupov použijeme: GFA (m2), počet podlaží, celková výšku, typ nosnej konštrukcie, náklady projektu, mieru prefabrikácie tieto budú spadať pod typ budovy.

Pre benchmarking aj tréning používame medián a MAD (Median Absolute Deviation). Pravidlo medián ± 2xMAD slúži na odhaľovanie anomálií (projekty s neštandardne vysokou/nízkou WGR), čo znižuje vplyv extrémov a súčasne podporuje cielený audit.

Predikčné jadro bude tvorené modelom ML algoritmom Random Forest (RF), ktorý sa javí ako najoptimalnejší preukázal superioritu v porovnaní s inými algoritmami, ako sú umelé neurónové siete (ANN), Gradient Boosting Machines (GBM) a Support Vector Regression (SVR), štandardne zvláda mix číselných kategórií a nelineárnych interakcií. Pri renovačných mikro štúdiach dosiahla stromová ensemble regresia presnosť $R^2 = 0{,}83$ [7]. Hoci ide o iný procesný typ (renovácie), ten istý princíp vstupov a nelineárneho modelovania je prenášateľný aj na novostavby s lokalizačnou kalibráciou. To rámcovo stanovuje dosiahnuteľnú hranicu presnosti pre náš účel.

Je kritické zdôrazniť, že úspech ML modelu je priamo úmerný rozsahu a kvalite vstupných dát. Ak stavebná spoločnosť disponuje len obmedzenými štatistikami, trénovanie vysoko presného ML modelu bude predstavovať počiatočné obmedzenie[8]. Kalibrácia modelu počtom stromov, max. hĺbkou, vzorkovanie znakov, z dôvodu menších počiatočných datasetov uprednostníme konzervatívne hĺbky a opatrné regularizačné parametre (learning rate, subsample). Výkon hodnotíme pomocou RMSE, MAE, R^2; z praktického hľadiska je cieľom $R^2 \geq 0{,}7$a postupná kalibrácia k vyšším hodnotám. Metodiku budeme následne porovnávať s tréningovými dátami, implementovať do praxe prenášať a porovnávať s údajmi stavieb z iných štátov.

5. Záver

Článok ukázal, že koeficientové prístupy založené len na ploche (WGR × GFA) sú pre novostavby nedostačujúce, keďže ignorujú kľúčové špecifiká stavby a vedú k systematickému skresleniu. Navrhnutá metodika preto kombinuje robustný baseline (mediánová WGR) s projektovo-špecifickým modelom Random Forest, ktorý využíva ľahko dostupné vstupy (GFA, počet podlaží, výška, typ nosnej konštrukcie, náklady, miera prefabrikácie) a robustnú štatistiku (medián ± 2·MAD). Takto postavený rámec zvyšuje presnosť odhadu, umožňuje identifikovať „drivery“ odpadu a je vhodný na priebežnú rekalibráciu pri raste lokálneho datasetu. Praktickým dôsledkom je spoľahlivejšie plánovanie, rozpočtovanie a cielenejší audit, pričom cieľová presnosť ($R^2 \geq 0{,}7$) je dosiahnuteľná už pri menších súboroch dát a ďalej rastie s rozšírením databázy a porovnávaním s údajmi zo zahraničia.

Použitá literatúra:

[1] C. G. Samal, D. R. Biswal, G. Udgata, a S. K. Pradhan, "Estimation, Classification, and Prediction of Construction and Demolition Waste Using Machine Learning for Sustainable Waste Management: A Critical Review", *Construction Materials*, roč. 5, č. 1, s. 10, mar. 2025, doi: 10.3390/constrmater5010010.
[2] A. Alashwal, *A Literature Review of Waste Prediction Models in Construction Projects*. 2019.
[3] B. C. Guerra, A. Bakchan, F. Leite, a K. M. Faust, "BIM-based automated construction waste estimation algorithms: The case of concrete and drywall waste streams", *Waste Management*, roč. 87, s. 825–832, mar. 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.03.010.
[4] R. An a Y. Guo, "Estimating construction and demolition waste in the building sector in China: Towards the end of the century", *Waste Management*, roč. 190, s. 285–295, dec. 2024, doi: 10.1016/j.wasman.2024.09.023.
[5] W. Lu, J. Lou, C. Webster, F. Xue, Z. Bao, a B. Chi, "Estimating construction waste generation in the Greater Bay Area, China using machine learning", *Waste Management*, roč. 134, s. 78–88, okt. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.08.012.
[6] Y. Fang, X. Shi, Y. Chen, a J. He, "Quantity Prediction of Construction and Demolition Waste Using Weighted Combined Grey Theory and Autoregressive Integrated Moving Average Model", *Sustainability*, roč. 16, č. 12, s. 5255, jan. 2024, doi: 10.3390/su16125255.
[7] W. Lu, W. Long, a L. Yuan, "A machine learning regression approach for pre-renovation construction waste auditing", *Journal of Cleaner Production*, roč. 397, s. 136596, apr. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136596.
[8] A. Lopes a C. A. Teixeira, "Data-Driven Optimization of Construction and Demolition Waste Management: Pattern Recognition and Anomaly Detection", *Sustainability*, roč. 17, č. 9, s. 4211, jan. 2025, doi: 10.3390/su17094211.
[9] E. de C. Teixeira, M. A. S. González, L. F. M. Heineck, A. P. Kern, a G. M. Bueno, "Modelling waste generated during construction of buildings using regression analysis", *Waste Manag Res*, roč. 38, č. 8, s. 857–867, aug. 2020, doi: 10.1177/0734242X19893012.

GEODESY AND CARTOGRAPHY

Ondrej Benko[1]
Študijný program: geodézia a kartografia, ročník: 2.

EXPERIMANTÁLNE OVERENIE PRESNOSTI SNÍMOK REKTIFIKOVANÝCH O SKRESLENIE OBJEKTÍVU

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF PRECISION OF IDEALISED IMAGES WITHOUT LENS DISTORTION

Abstract
This paper focuses on testing the precision of idealized images without lens distortion for edge detection in the calibration of digital levelling staffs. A prototype photogrammetric calibration system was developed and tested to select the optimal lens and processing software. This system will employ edge detection for the precise localization of coded bar segments. The study tests the use of idealized versus distorted images for edge detection. A practical experiment using projective transformation of idealized image coordinates to a high-precision reference grid showed that their accuracy is insufficient for calibration requirements. The results confirm that edge detection must be performed on distorted images, with lens distortion corrections applied afterward to the detected edges.

Kľúčové slová / Key Words
kalibrácia; nivelačná lata; fotogrametria; detekcia hrán; distorzia objektívu;
calibration; levelling staff; photogrammetry; edge detection; lens distortion;

1. Úvod

Metódy počítačového videnia a spracovania digitálneho obrazu zaznamenali v posledných rokoch výrazný pokrok a umožňujú prostredníctvom presného subpixelového merania veľmi presne určovať polohu objektov na obrazových záznamoch. Naším dlhodobým cieľom je tieto pokročilé metódy skombinovať s presnými fotogrametrickými meraniami a využiť ich pri vývoji kalibračného systému pre kódové nivelačné laty, založeného primárne na fotogrametrickom princípe [1], [2]. Súčasné kalibračné systémy využívajú predovšetkým princíp laserovej interferometrie, zatiaľ čo digitálne spracovanie obrazu má v procese len doplnkovú úlohu [3]. Laserová interferometria síce poskytuje vysokú presnosť merania dĺžok, avšak zároveň si vyžaduje zložitú manipuláciu, náročnú údržbu a hlavne je finančne nákladná. Cieľom vyvíjaného fotogrametrického riešenia je odstrániť tieto nevýhody, no pritom zachovať porovnateľnú presnosť kalibrácie s laser-interferometrickými komparátormi.

V rámci predchádzajúcej etapy výskumu bol vytvorený prototyp fotogrametrického systému, zatiaľ bez pridanej reálnej mierky. Na tomto prototype sme realizovali testy zamerané na presnosť spracovania a kvalitu vyhotovených snímok. Porovnávali sme dva spracovateľské softvéry – Agisoft Metashape [4] a Photomodeler [5] a tri dostupné objektívy – Nikon AF-S NIKKOR 35 mm f/1.8G ED (Nikkor 35 mm G), Nikon AF NIKKOR 20 mm f/2.8D (Nikkor 20 mm D) a Nikon AF-S NIKKOR 20 mm f/1.8G ED (Nikkor 20 mm G). Výsledky ukázali, že objektív Nikkor 35 mm G spolu so spracovateľským softvérom Photomodeler sú schopné dosiahnuť opakovateľnosť merania dĺžok do 0,010 mm, čo je stanovené kritérium presnosti pre kalibráciu kódových nivelačných lát [3]. Podrobnejší opis prototypu

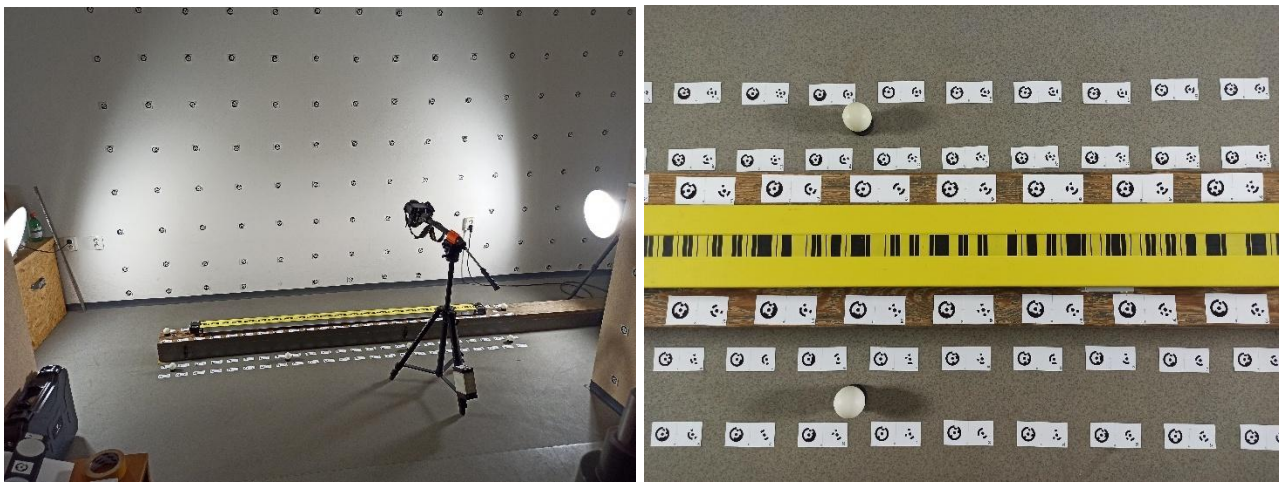
[1] Ing. Ondrej Benko, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

fotogrametrického kalibračného systému aj s doteraz dosiahnutými výsledkami sa nachádza v kapitole 2.

V tomto príspevku sa zameriavame na pokračovanie analýzy presnosti spracovania snímok, konkrétne na testovanie presnosti odstránenia radiálnej a decentračnej distorzie zo snímok a na posúdenie potenciálu takto prekreslených snímok pre automatickú detekciu hrán dielikov kódového pásu nivelačnej laty. Využitie snímok bez skreslení by uľahčilo automatickú detekciu hrán, keďže by sme detegovali iba priame línie namiesto kriviek, zoskupili by sme totožné hrany merané na rôznych snímkach a určili ich finálnu polohu pomocou metódy najmenších štvorcov.

2. Aktuálny stav prototypu fotogrametrického systému na kalibráciu nivelačných lát

Fotogrametrický systém na kalibráciu nivelačných lát aktuálne pozostáva z dreveného kvádra, ktorý imituje podstavu, do ktorej sa vloží nivelačná lata. Tento kváder má rozmery približne 0,20 m x 0,20 m v priereze a dĺžku približne 3,00 m. Na okrajoch kvádra a v jeho okolí sú nalepené usporiadané dvojice kódových terčov na matnú nelesklú fóliu, tvoriace pravouhlú sieť s rozstupom 0,10 x 0,10 m. Veľkosť stredov kódových terčov na snímkach je 30-40 pixelov, čo vytvára vhodné podmienky pre presnú subpixelovú detekciu pomocou metódy zhody podľa predlohy (Template Matching) [6]. Dvojice terčov sú použité z dôvodu rozdielneho spracovania v testovaných softvéroch – Photomodeler využíva RAD (Ringed Automatically Detected) kódové terče, zatiaľ čo Agisoft Metashape pracuje s 12-bitovými (resp. 8-bitovými, 16-bitovými...) kódovými terčmi. Na zabezpečenie kvalitného osvetlenia sú využité dve štúdiové svietidlá Fomei Easy Light 3. Snímkovanie je realizované pomocou kamery Nikon D850 zo špeciálne upraveného statívu na nadirové snímkovanie (Obr. 1). Snímky sú vyhotovené v štyroch pásoch nad objektom v príslušnej predmetovej vzdialenosti 1,0 m pre 35 mm objektív a 0,6 m pre 20 mm objektívy. Na koncoch objektu boli doplnené snímky z viacerých uhlov pre väčšiu robustnosť kamerovej siete. Snímkovacia základnica medzi susednými snímkami je približne 0,10 m, od čoho sa odvíja aj celkový počet snímok (92). Pri snímkovaní je nastavené oneskorenie spúšte o 2 s aby sme predišli mechanickým vibráciám pri stláčaní spúšte. Zaostrovanie snímok sme využili manuálne, pričom sme zaostrili prvú snímku a ďalej sme nepreostrovali. Nepreostrovaním medzi jednotlivými snímkami sme zabezpečili čo najstabilnejšie prvky vnútornej orientácie kamery [7]. Clona pri snímkovaní je nastavená vždy na čo najväčšiu hodnotu, aby sme zabezpečili čo najlepšiu hĺbku ostrosti. Hodnota ISO je nastavená na 100, aby sme predišli nežiadúcemu šumu na snímkach. Na základe použitej clony a ISO hodnoty sme určili expozičnú dobu (1/3 s až 1/2 s). Získané snímky sú následne spracované v softvéri – detekcia stredov kódových terčov, odstránenie odľahlých meraní, optimalizácia parametrov kalibrácie kamery, vloženie približnej mierky a meranie kontrolných dĺžok medzi bodmi v strede kvádra.



Obr. 1: Ukážky prototypu fotogrametrického kalibračného systému

Porovnávali sme výsledky medzi jednotlivými spracovateľskými softvérmi (Agisoft Metashape a Photomodeler) a použitými objektívmi (Nikkor 35 mm G, Nikkor 20 mm D a Nikkor 20 mm G). Pre každý objektív sme vyhotovili 3 série snímkovania. Na základe týchto troch sérií sme určili stredné hodnoty a štandardné odchýlky kontrolných dĺžok. Výsledky sú prezentované v tabuľke nižšie (Tab. 1).

Tab. 1: Výsledky testovania presnosti spracovateľských softvérov a objektívov

Softvér	**Photomodeler Premium 2020.1.1**					
Objektív	**Nikkor 35 mm G**		**Nikkor 20 mm D**		**Nikkor 20 mm G**	
Parameter	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD
200-201 [mm]	598,724	0,005	598,750	0,012	598,726	0,006
201-202 [mm]	549,625	0,001	549,594	0,012	549,599	0,002
202-203 [mm]	549,273	0,003	549,247	0,002	549,258	0,006
203-204 [mm]	500,757	0,002	500,773	0,017	500,782	0,009
200-204 [mm]	2198,359	0,001	2198,335	0,007	2198,339	0,004
Max. rezíduum	0,32 pix		1,03 pix		0,55 pix	
RMS rezíduum	0,09 pix		0,24 pix		0,16 pix	

Softvér	**Agisoft Metashape Professional 2.1.0**					
Objektív	**Nikkor 35 mm G**		**Nikkor 20 mm D**		**Nikkor 20 mm G**	
Parameter	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD
200-201 [mm]	598,756	0,004	598,825	0,025	598,777	0,002
201-202 [mm]	549,623	0,003	549,571	0,007	549,596	0,001
202-203 [mm]	549,273	0,001	549,233	0,008	549,238	0,004
203-204 [mm]	500,748	0,002	500,744	0,015	500,751	0,006
200-204 [mm]	2198,379	0,001	2198,342	0,008	2198,335	0,007
Max. rezíduum	0,62 pix		1,65 pix		1,08 pix	
RMS rezíduum	0,16 pix		0,27 pix		0,18 pix	

Na základe dosiahnutých výsledkov bol pre ďalší vývoj zvolený objektív Nikkor 35 mm G, ktorý dosiahol najlepšiu opakovateľnosť meraní a najmenšie hodnoty rezíduí na kódových terčoch. Na spracovanie snímok bol vybraný softvér Photomodeler, ktorý dosiahol presnejšie a stabilnejšie výsledky v porovnaní s programom Agisoft Metashape. Photomodeler je zároveň špecializovaný na spracovanie presnej konvergentnej fotogrametrie, zatiaľ čo Agisoft Metashape je primárne určený na fotogrametrické skenovanie.

3. Problematika detekcie hrán zo snímok

Výsledná presnosť fotogrametrického systému na kalibráciu nivelačných lát sa odvíja od troch základných parametrov [2]:

- presnosť určenia mierky,
- kvalita spracovania snímok (v zmysle správneho stochastického modelu a presnosti merania obrazových súradníc),
- kvalita snímok (v zmysle osvetlenia, hĺbky ostrosti a redukcie optických chýb).

V predchádzajúcej kapitole sme analyzovali kvalitu snímok a kvalitu spracovania snímok (presného určenia prvkov vnútornej a vonkajšej orientácie kamery). Ak opomenieme vloženie reálnej, presnej

mierky do kalibračného systému (čo bude predmetom ďalšieho vývoja) a vložíme mierku zatiaľ iba ako hodnotu približnú skutočnosti, ďalším krokom bude automatická detekcia hrán dielikov kódového pásu digitálnej nivelačnej laty, ako pokračovanie analýzy kvality spracovania snímok. V tejto súvislosti možno uvažovať o dvoch prístupoch k automatickej detekcii hrán:

a) Prekresliť (idealizovať) snímky priamo v spracovateľskom softvéri na základe prvkov vnútornej orientácie kamery určených samokalibráciou. Po idealizácii je možné automaticky detegovať hrany dielikov ako priamky, následne priradiť rovnaké dieliky na rôznych snímkach k sebe a určiť ich výslednú polohu pomocou metódy najmenších štvorcov.
b) Detegovať hrany dielikov ako krivky priamo na skreslených snímkach a následne aplikovať korekcie z vplyvu radiálnej a decentračnej distorzie. Po tejto úprave je možné priradiť rovnaké hrany dielikov na rôznych snímkach k sebe a určiť ich výslednú polohu pomocou metódy najmenších štvorcov.

Variant a) prináša do spracovania výrazné zjednodušenie, keďže odstránenie distorzie objektívu prebieha automatizovane priamo v spracovateľskom softvéri. Detekcia hrán sa tak redukuje na detekciu priamych línií, čo zjednodušuje celý postup. Otázkou však zostáva, do akej miery je softvér schopný prekresliť snímku bez distorzie s takou presnosťou, aby výsledky zodpovedali požiadavkám kalibrácie digitálnych nivelačných lát. Overeniu presnosti takto idealizovaných snímok je venovaná praktická časť tohto príspevku.

Variant b) poskytuje väčšiu kontrolu nad spracovaním a teoreticky umožňuje dosiahnuť vyššiu presnosť, keďže distorzia objektívu sa neodstraňuje z celej snímky, ale len z detegovaných hrán dielikov. Tento prístup však prináša vyššiu výpočtovú a metodickú náročnosť, pretože je potrebné presne detegovať zakrivené hrany a následne ich korigovať na základe ich radiálnej vzdialenosti od hlavného bodu danej snímky a určených parametrov radiálnej a decentračnej distorzie.

Presnosť určenia finálnej polohy hrany dieliku môžeme vypočítať na základe zjednodušeného vzorca na hodnotenie presnosti konvergentnej fotogrametrie [8]:

$$m_p = \frac{Y}{f} \cdot P \cdot m_{px} \tag{1}$$

kde m_{px} je presnosť merania obrazových súradníc, Y je predmetová vzdialenosť, f je ohnisková vzdialenosť použitého objektívu a P je veľkosť pixela na snímači. Pri použití objektívu Nikkor 35 mm G a predmetovej vzdialenosti približne 1,0 m je požadovaná výsledná presnosť merania na úrovni minimálne 0,1 pixela, čo v našich podmienkach zodpovedá približne 0,010 mm (GSD ≈ 0,1 mm). Na dosiahnutie tejto hodnoty je potrebné určiť polohu hrany s presnosťou približne 0,08 pixela. Vzhľadom na to, že každá hrana bude určená z minimálne 20 snímok, podľa zákona o šírení stredných chýb [9] sa požadovaná presnosť zvoľní na približne 0,36 pixela. Moderné algoritmy detekcie hrán v kombinácii so subpixelovým meraním sú schopné takúto presnosť zabezpečiť. Ak však zvolíme prístup a) spracovania snímok, je nevyhnutné, aby dané kritérium presnosti spĺňalo aj samotné prekreslenie snímok.

4. Overenie presnosti idealizovanej snímky

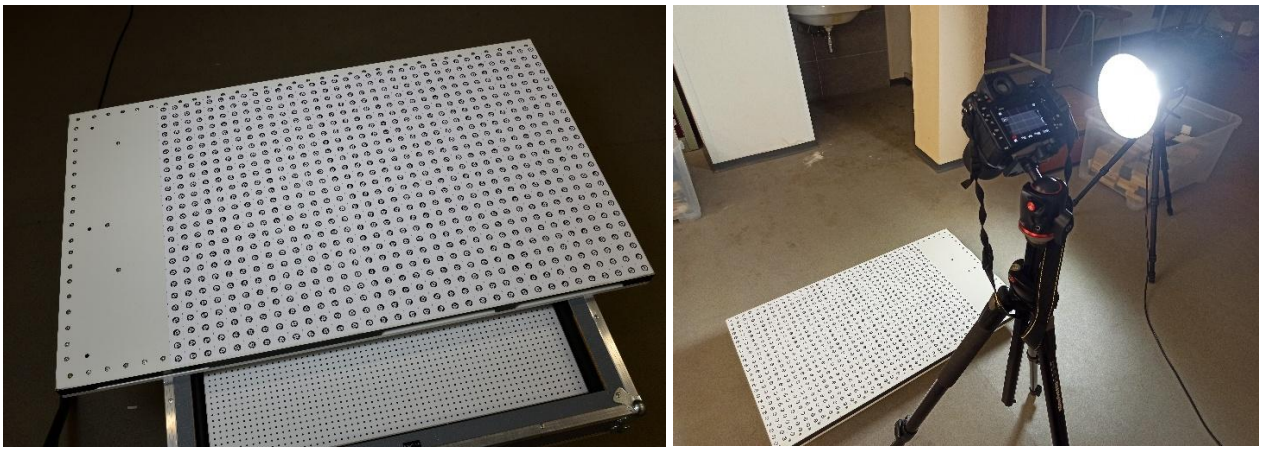
Pre overenie presnosti idealizovanej snímky sme navrhli experiment pozostávajúci z niekoľkých častí:

1. Presné určenie súradníc RAD kódových terčov na kalibračnej platni – využili sme kalibračnú platňu od firmy Steinbichler určenú na kalibráciu triangulačného skenera Comet L3D. Snímkovanie sme vykonali pomocou kamery Nikon D850 a objektívu Nikkor 35 mm G zo statívu, pričom sme priložili na otočnú kalibračnú platňu Steinbichler kalibračnú platňu s RAD kódovými terčmi. Vyhotovili sme 29 snímok, ktoré sme spracovali v programe Photomodeler. Pomocou známej dĺžky medzi dvoma zvolenými bodmi kalibračnej platne Steinbichler sme

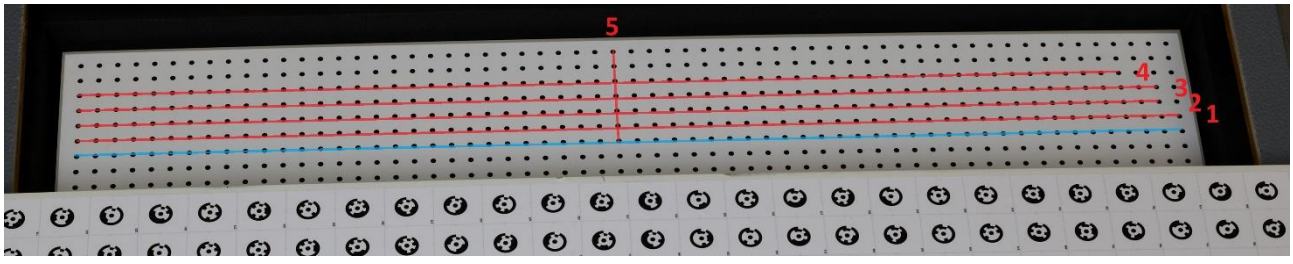
vložili to systému metrickú mierku a následne určili súradnice RAD kódových terčov v miestnom súradnicovom systéme RAD kalibračnej platne. Presnosť určenia mierky bola overená pomocou piatich kontrolných dĺžok, odmeraných na kalibračnej platni Steinbichler (Obr. 3). Rezíduá kontrolných dĺžok a ich kvadratický priemer je znázornený v tabuľke (Tab. 2). S prihliadnutím na tieto rezíduá a na základe použitej mierky a kvality spracovania odhadujeme presnosť určenia polohy RAD terčov na kalibračnej platni na 0,010 mm (Obr. 2).

Tab. 2: Rezíduá kontrolných dĺžok pri vkladaní metrickej mierky

Číslo kontrolnej dĺžky	Dĺžka na kalibračnej platni Stainbichler [mm]	Dĺžka na kalibračnej platni s RAD terčmi [mm]	Rezíduum [mm]
1	599,552	599,550	0,002
2	589,537	589,547	-0,010
3	589,531	589,535	-0,004
4	589,540	589,535	0,005
5	59,969	59,958	0,011
RMS			**0,007**



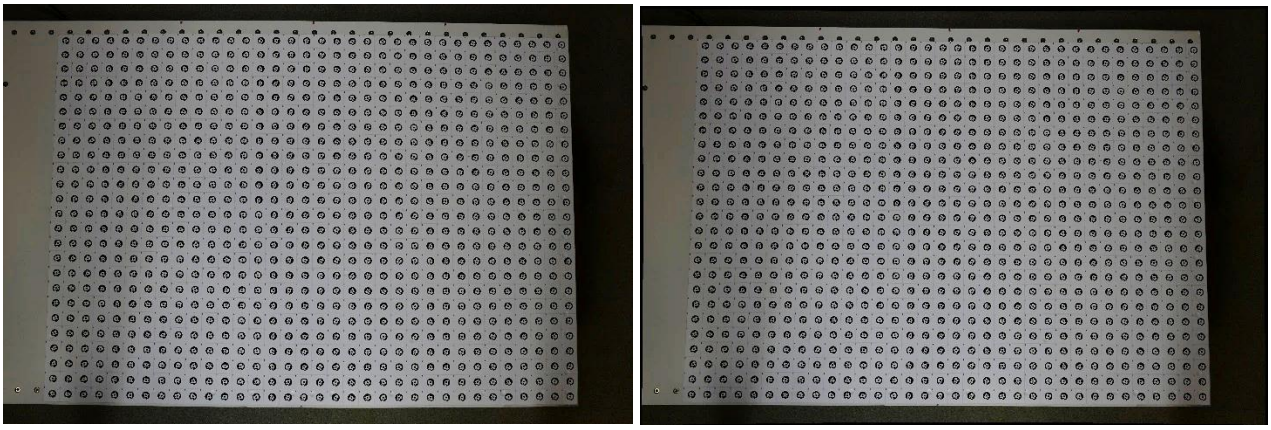
Obr. 2: Kalibrácia vrchnej kalibračnej platne s RAD terčmi na podklade spodnej kalibračnej platne Steinbichler (vľavo), snímkovanie kalibračnej platne s RAD kódovými terčmi (vpravo)



Obr. 3: Detail a popis vloženej mierky (modrá farba) a kontrolných dĺžok (červená farba)

2. Podobným spôsobom ako v prvom kroku sme opäť nasnímkovali kalibračnú platňu s RAD kódovými terčmi, avšak tentokrát s pridaním nadirovej snímky zvrchu a bez pridanej mierky (Obr. 2). Celkovo sme vyhotovili 19 snímok. Opäť sme projekt spracovali v programe Photomodeler, kde sme pomocou samokalibrácie kamery určili prvky vnútornej orientácie kamery.

3. Na základe určený parametrov radiálnej a decentračnej distorzie v predchádzajúcom kroku, sme idealizovali snímky v celom projekte. Idealizáciou sa odstráni radiálna a decentračná distorzia snímok, čo overíme na základe porovnania snímok pred a po idealizácií (po idealizácií vzniknú po okrajoch snímky upravené hrany pôvodnej snímky, ktoré vyzerajú ako čierne kruhové výseky) (Obr. 4).



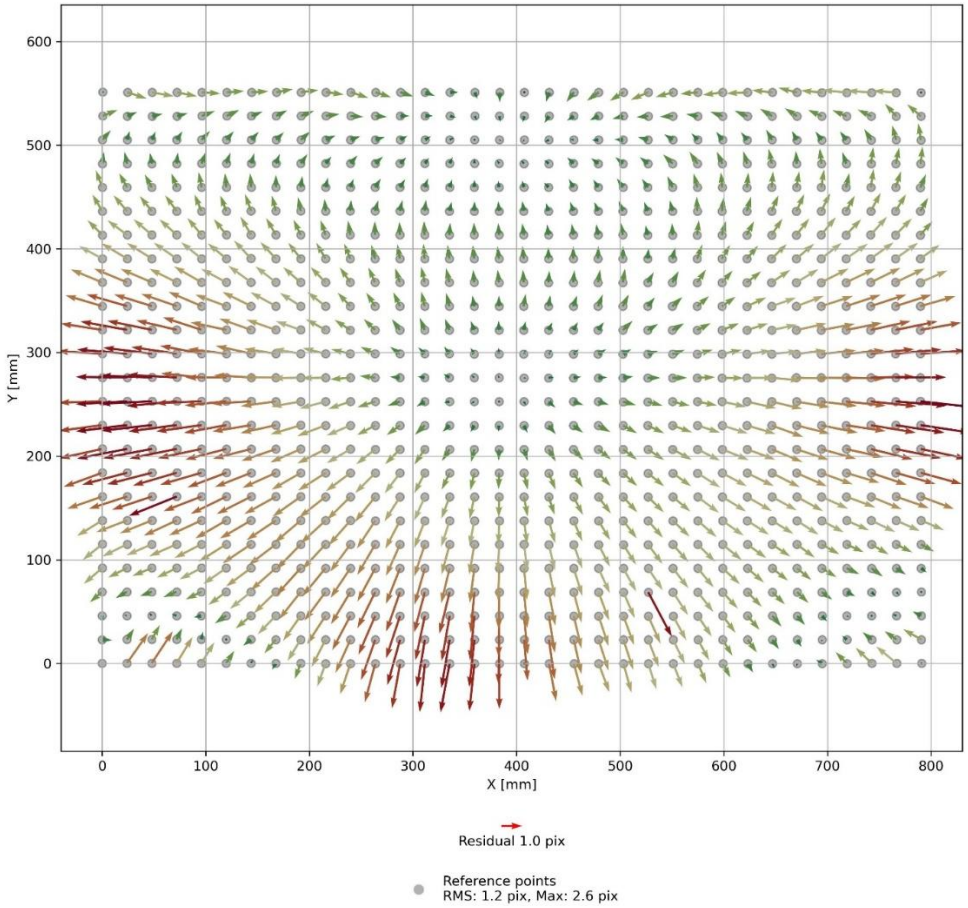
Obr. 4: Porovnanie skreslenej snímky s distorziou (vľavo) a rektifikovanej snímky bez distorzie (vpravo)

4. Na idealizovanej nadirovej snímke automatizovane pomocou metódy zhody podľa predlohy (Template Matching) presne odmeriame obrazové súradnice stredov RAD kódových terčov.
5. Pomocou projektívnej transformácie na vybranej množine ôsmich identických bodov pravidelne rozmiestnených po okraji snímky transformujeme merané obrazové súradnice do referenčného súradnicového systému. Na projektívnu transformáciu využívame softvér Aerosys 7.2 [10]. Rezíduá transformácie by mali priamo reprezentovať kvalitu prekreslenia snímky. Veľkosti rezíduí projektívnej transformácie na identických bodoch sú znázornená v tabuľke (Tab. 3).

Tab. 3: Rezíduá projektívnej transformácie na identických bodoch z programu AeroSys

ČÍSLO BODU	REZÍDUÁ	
	X [mm]	Y [mm]
1	-0,119	-0,120
13	0,254	-0,003
25	-0,125	-0,016
426	-0,025	0,234
450	0,005	0,051
826	0,166	-0,188
838	-0,297	0,010
850	0,141	-0,038
RMS	0,170	0,105
	0,141	

6. Vizualizujeme rezíduá do vektorového grafu pomocou programovacieho jazyka Python (Obr. 4).



Obr. 4: Vizualizácia rezíduí vo vektorovom grafe

Okrem vizualizácie sme z rezíduí projektívnej transformácie vypočítali aj kvadratické priemery rezíduí (RMS) a ich maximálnu hodnotu (Max). Hodnota RMS rezíduí dosahuje veľkosť 1,2 pixela, čo je s porovananím s určenou dovolenou odchýlkou 0,36 pixela príliš veľká hodnota. Hrany kódovej laty sú v takomto prípade síce priame línie, avšak ich poloha nie je dostatočne presná na požiadavky kalibrácie kódovej nivelačnej laty. Maximálne hodnoty rezíduí vznikajú po okrajoch snímky, čo môže znamenať, že reziduálna distorzia objektívu, teda distorzia, ktorú ani po aplikácií korekcií z radiálnej a decentračnej distorzie nevieme ostrániť, má najväčší vplyv práve tu. To do budúcna znamená, že stojí za zváženie akú časť snímky využijeme na detekciu hrán dielikov, pričom by sme sa mali čo najviac držať stredu snímky – okoliu hlavného bodu, ktoré je najmenej skreslené.

5. Záver

Príspevok sa v prvej časti venuje popisu aktuálneho stavu vývoja fotogrametrického systému na kalibráciu nivelačných lát. Bližší opis je venovaný komponentom tohto systému a popísané sú aj výsledky doterajších experimentov testujúcich kvality snímok, kvality spracovania snímok, presnosť merania kontrolných dĺžok a opakovateľnosť dosiahnutých výsledkov. Výsledkom tejto časti príspevku je ukážka doterajšieho postupu vývoja a výber objektívu a spracovateľského softvéru s najlepšími dosiahnutými výsledkami.

V teoretickej časti sa venujeme pokračovaniu analýzy spracovania snímok. Po presnom určení prvkov vnútornej a vonkajšej orientácie kamery na základe blokového vyrovnania zväzku lúčov pokračujeme so spracovaním digitálneho obrazu – s určením hrán dielikov kódového pásu digitálnej

nivelačnej laty. V príspevku sú predstavené dva možné varianty, ktoré sú založené na odstránení distorzie objektívu pred alebo po detekcií hrán kódového pásu nivelačnej laty.

Praktická časť príspevku sa venuje testovaniu presnosti prekreslenia snímky bez distorzie v programe Photomodeler. Automatizované prekreslenie snímok by uľahčilo proces spracovania snímok a taktiež detekciu hrán – detegovali by sa priame línie namiesto kriviek. Overenie presnosti prekreslených snímok bolo realizované experimentom, kde sme porovnávali obrazové súradnice merané na prekreslenej snímke s referenčnými hodnotami určenými s vysokou presnosťou na základe kalibrácie s kalibračnou platňou Steinbichler. Obrazové súradnice boli projektívne transformované do daného referenčného systému a rezíduá transformácie vykreslené do vektorového grafu. Maximálna dovolená odchýlka bola určená na hodnotu 0,36 pixela, čo však rezíduá na prekreslenej snímke nedosahujú. V takomto prípade bude nutné pre zabezpečenie kritéria presnosti kalibrácie kódových nivelačných lát hrany dielikov detegovať na neskreslených snímkach a až následne zaviesť korekcie z distorzie objektívu.

Poďakovanie

„Tento článok vznikol vďaka podpore nadačného fondu Nadácie STU pre rozvoj talentov - Štipendium rodiny Slavojovcov (Fond Slavojovcov)“.

Literatúra

[1] Maas, H.; Hampel, A. Photogrammetric Techniques in Civil Engineering, Material Testing and Structure Monitoring. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 2006, 72, 39–45.

[2] Luhmann, T. Close Range Photogrammetry for Industrial Applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 2010, 65, 558–569.

[3] Baričević, S.; Staroveški, T.; Barković, Đ.; Zrinjski, M. Measuring Uncertainty Analysis of the New Leveling Staff Calibration System. Sensors 2023, 23, 6358.

[4] Agisoft. Metashape 2.1.0; Agisoft LLC: St. Petersburg, Russia, 2023.

[5] Photomodeler. Premium 2020.1.1; Photomodeler Inc.: Vancouver, Canada, 2020.

[6] Luhmann, T.; Robson, S.; Kyle, S.; Boehm, J. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging, 2nd ed.; Whittles Publishing: Dunbeath, UK, 2013.

[7] Fraser, C.S. Automatic Camera Calibration in Close Range Photogrammetry. Photogrammetric Record 2013, 28, 1–16.

[8] Fraštia, M. Vybrané aplikácie fotogrametrie v oblasti merania posunov; Slovenská technická univerzita: Bratislava, Slovakia, 2017.

[9] Kubáčková, Ludmila. Metódy spracovania experimentálnych údajov. Bratislava : Veda, 1990. 324 s. ISBN 80-224-0104-8.

[10] Cardinal Systems, LLC. AeroSys 7.2. Cardinal Systems, LLC, 2006.

Ján Brindza[1]
Študijný program: Geodézia a kartografia, 4. ročník

URČENIE PRVKOV VONKAJŠEJ ORIENTÁCIE MEDZI 3D A 2D LIDARMI

DETERMINING EXTRINSIC CALIBRATION PARAMETRES BETWEEN 3D AND 2D LIDARS

Abstract
Developing mapping systems composed of multiple sensors requires determining the extrinsic calibration parametres among the sensors. Calibration is necessary because each sensor's measurements are expressed in its own coordinate system. When fusing multiple sensors, for example in simultaneous localization and mapping, it is necessary to estimate the extrinsic parameters (rotation and translation). This article focuses on the extrinsic calibration of three 2D LiDARs and one 3D LiDAR using a trihedral. First, the data were transformed into the coordinate system of the trihedral. These transforms were then used to compute the pairwise extrinsic calibrations among the LiDARs.

Kľúčové slová / Key Words
LiDAR, prvky vonkajšej orientácie, mračno bodov, súradnicový systém

1. Úvod

LiDARy sú v dnešnej dobe jedným z najrozšírenejších zariadení využívané v robotike. Využívajú sa pretože pomocou laserového lúča získavajú priestorovú informáciu o okolitom prostredí a vytvoria mračno bodov. Využívajú sa pre navigáciu [1], pre určenie polohy [2], pre identifikáciu objektov [3], pre 3D rekonštrukciu [4] a pre simultánnu lokalizáciu a mapovanie (SLAM) [5]. Na základe získanej priestorovej informácie môžeme LiDARy rozdeliť na 2D a 3D. Výsledkom merania 3D LiDARu je 3D mračno bodov okolitého prostredia, pričom sa laserový lúč pohybuje horizontálne a vertikálne čím je zachytené trojrozmerné prostredie so súradnicami X, Y a Z. Pri 2D LiDAROch je výsledkom merania 2D mračno bodov so súradnicami X a Y, kde sa laserový lúč pohybuje v jednej rovine, pričom merané body predstavujú stopu roviny LiDARu premietnutú do trojrozmerného priestoru ako úzky pás. Najväčšou výhodou 2D LiDARov oproti 3D LiDARom je ich menšia veľkosť, nižšie obstarávacie náklady a lepšia stabilita. Pri použití dvoch a viac 2D LiDARov na jednej platforme sme schopný získať 3D informáciu z trojrozmerného prostredia. Pre získanie 3D informácie z 2D LiDARov je potrebné transformovať súradnicový systém (SS) LiDARov do spoločného SS. Transformácia do spoločného SS je zabezpečená určením prvkov vonkajšej orientácie (PVO) (angl. extrinsic calibration) medzi dvojicou 2D/3D LiDARov.

Určenie PVO medzi 2D LiDARmi je zložitejšie kvôli získavaniu informácii v 2D rovine na rozdiel od 3D LiDARov. Najdôležitejšou časťou určenia PVO je nájdenie minimálne 3 identických bodov v trojrozmernom priestore medzi dvomi 2D LiDARmi. Nájdenie identických bodov zhoršuje aj fakt, že spektrum laserového lúča je mimo spektra viditeľného svetla čo robí merané body LiDARom

[1] Ján, Brindza, Ing., Katedra geodézie, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

neviditeľnými ľudskému oku. Existujú však dostupné metódy na určenie PVO 2D LiDARov, ktoré sa dajú rozdeliť na základe toho či je použitý k ich určeniu aj ďalší snímač.

Pri určovaní PVO za pomoci ďalšieho snímača sa využívajú najmä kamery. Jeden z takých prístupov popisuje Guoyang Xie a kol. [6], kde popisuje určenie PVO LiDARov za pomoci kamery a šachovnicovej cieľovej značky. V prvom rade sa vypočítajú transformačné parametre medzi každým LiDARom a kamerou a z týchto transformačných parametrov sa následne určia PVO medzi LiDARmi. Určenie transformačného kľúča medzi LiDARmi a kamerou popisuje Abdelkrim Abanay a kol. [7], čo sa dá využiť aj na určenie transformačného kľúča medzi dvojicou LiDARov. Využíva výhodu toho, že na kameru bol upevnený infračervený filter, vďaka čomu bolo možné zaznamenať laserovú stopu premietnutú na terče.

Vyvinuté sú aj prístupy, pomocou ktorých je možné priamo určiť PVO 2D LiDARov navzájom. Jedným z nich je od Tomás Tófalvi a kol. [8], ktorý pomocou valcového stĺpa a troch rôznych polôh dvojice 2D LiDARov určil ich PVO. Ďalší prístup je od autora Mengwen He a kol. [9], ktorý na základe dvoch trajektórií v tvare písmena V, ktoré musia byť rovné, transformuje 2D LiDARy. Z každého LiDARu bolo merané mračno bodov transformované z 2D priestoru do 3D priestoru pomocou približných PVO. Následne bol z každého 2D LiDARu vytvorené mračno bodov záujmového prostredia, ktoré sa následne transformovalo na referenčný LiDAR pomocou minimalizácie vzdialeností identifikovaných rovín. Inšpiráciou pre kalibráciu vykonanú v tomto článku bol autor Fei Zhu a kol. [10], ktorý využíva trojsten, resp. roh miestnosti (2 steny a podlaha) pre transformáciu 2D LiDARov. Prieniky rovín stien a podlahy vytvárajú osi trojrozmerného súradnicového systému, pričom cieľom je určiť súradnice bodov na týchto osiach v mračne bodov, vďaka čomu je možné určiť PVO medzi dvojicou 2D LiDARov. Metóda predpokladá tri ideálne kolmé roviny, ktoré predstavujú trojsten. V reálnych podmienkach je nemožné nájsť tri ideálne kolmé roviny, pričom odchýlka od kolmosti môže ovplyvniť samotný výsledok kalibrácie. Vplyvu nekolmosti týchto rovín sa venoval Zhaozheng Hu a kol. [11], kde vykonal štatistický test vplyvu uhla medzi tromi rovinami. Rovnako sa tomu venoval aj Jia Fan a kol. [12], ktorý neanalyzovali len vplyv odchýlky od ortogonality ale zároveň aj demonštroval, že malá odchýlka má nízky vplyv na presnosť určenia PVO. Z toho dôvodu bude neortogonalita rovín zanedbaná.

Článok sa venuje určeniu PVO medzi 3D LiDARom a trojicou 2D LiDARov, ktoré sú umiestnené na spoločnej platforme a sú súčasťou vytvoreného mobilného mapovacieho systému na mapovanie vnútorných priestorov budov. V prvej časti článku sa venujeme samotnej metóde a spôsobu transformácie medzi 2D LiDARmi. V ďalšej časti je popísaný samotný priebeh experimentu a popísané dosiahnuté výsledky. Posledná časť článku je venovaná zhodnoteniu dosiahnutých výsledkov PVO LiDARov.

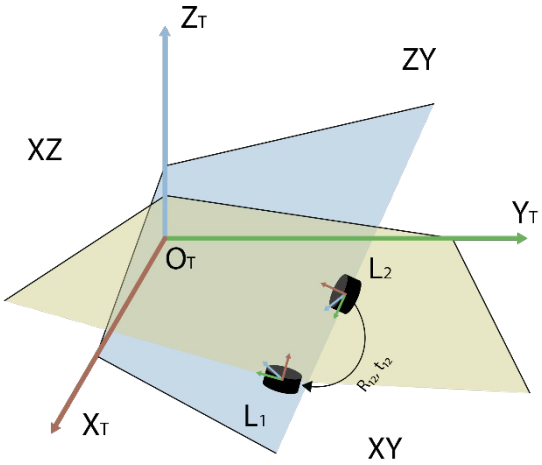
2. Metodológia určenia PVO LiDARov

Určenie PVO je založené na skenovaní trojstenu v jednej polohe dvojice 2D LiDARov. V prípade potreby kalibrácie viac než dvoch 2D LiDARov sa tento postup môže niekoľkokrát zopakovať ako určenie PVO medzi dvojicou 2D LiDARov.

Trojsten definujeme ako trojicu navzájom kolmých rovín XY, XZ, YZ (Obr.1). Prienikom týchto rovín dostaneme osi trojstenu X_T, Y_T, Z_T s počiatkom v bode O_T, čím máme definovaný SS trojstenu, resp. referenčný SS. Na Obr. 1 sú zobrazené dva 2D LiDARy ako L_1 a L_2 spolu s ich SS. LiDARy skenujú body vo svojich rovinách, žltej a modrej farby. LiDARy musia byť orientované k trojstenu tak, aby ich optická rovina pretínala všetky roviny trojstenu. Merané body P_1, P_2 2D LiDARov L_1, L_2 sú následne transformované do referenčného SS ako body P_T (1), pomocou rotácii R_{T1}, R_{T2} a translácii t_{T1}, t_{T2}. Pomocou referenčného SS je teda možné prepojiť SS LiDARov vďaka čomu dostaneme rotačnú maticu R_{12} a translačný vektor t_{12} (2).

$$P_T = R_{T1} \cdot P_1 + t_{T1}$$
$$P_T = R_{T2} \cdot P_2 + t_{T2} \quad (1)$$
$$R_{12} = R_{T1}^{-1} \cdot R_{T2}$$
$$t_{12} = R_{T1}^{-1} \cdot (t_{T2} - t_{T1}) \quad (2)$$

Na základe hore uvedených vzorcov môžeme metódu určenia PVO rozdeliť na dve časti. Prvá časť výpočtu podľa vzorca (1) sa venuje transformácii SS LiDARu do referenčného SS a druhá časť výpočtu podľa vzorca (2) sa venuje získaniu PVO z rotácii a translácii LiDARov do referenčného SS.



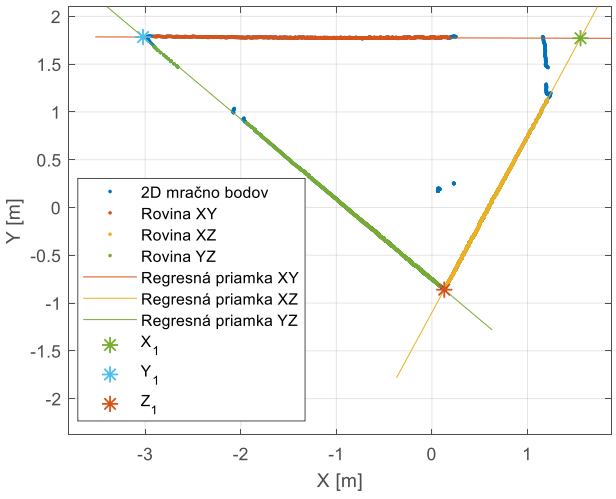
Obr. 1: Schéma kalibrácie dvojice 2D LiDARov L_1, L_2

2.1 Transformácia do referenčného SS

Transformácia SS LiDARov do referenčného SS je popísaná ako transformácia jedného 2D LiDARu do referenčného SS. Ako už bolo spomenuté vyššie, 2D LiDAR musí byť orientovaný voči trojstenu tak, aby zachytil všetky jeho roviny (Obr.1). Celý výpočet je rozdelený do štyroch krokov ktoré si postupne popíšeme.

V prvok kroku sú z mračna bodov manuálne segmentované body, ktoré patria jednotlivým rovinám (Obr. 2). Bodmi v jednotlivých rovinách je preložená regresná priamka, ktorá je definovaná posunom *a* a smernicou *b* (3). Týmto krokom je získaná v každej rovine trojstenu jedna regresná priamka (Obr. 2).

$$y = a + b \cdot x \quad (3)$$



Obr. 2: Spracovanie 2D mračna bodov

Druhým krokom výpočtu je výpočet súradníc troch bodov, ktoré sa nachádzajú na osiach trojstenu v SS LiDARu. Súradnice bodov na osiach trojstenu sú získané ako priesečníky priamok. Bod X_1 na osi X získame z koeficientov regresných priamok v rovine XY (a_1, b_1) a XZ (a_2, b_2). Súradnicu x vypočítame z rovnosti rovníc regresných priamok (3) pre súradnicu y (4). Súradnicu y následne dopočítame len dosadením do rovnice jednej z regresných priamok (3). Body Y_1 a Z_1 (Obr. 2) sú dopočítané analogicky.

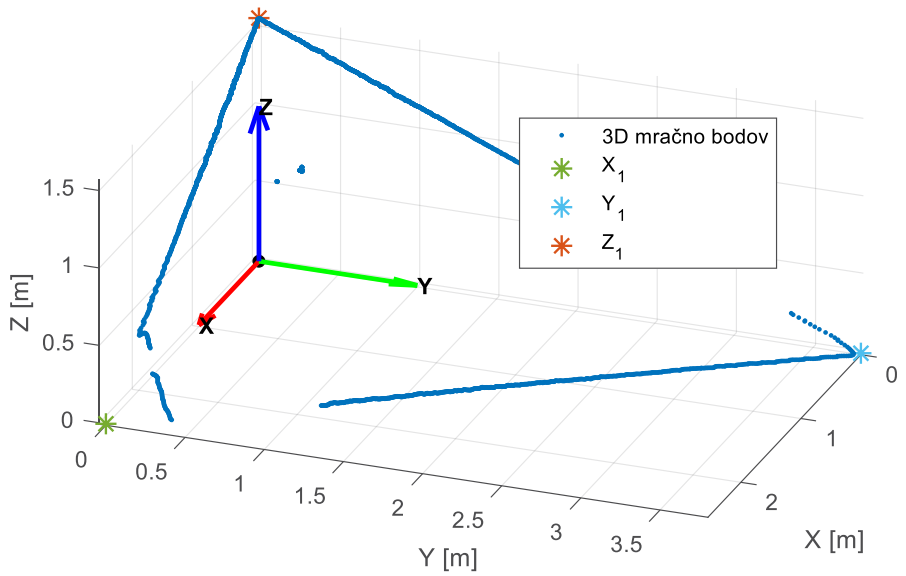
$$x = (a_2 - a_1)/(b_1 - b_2) \tag{4}$$

V treťom kroku je potrebné vypočítať súradnice troch bodov, ktoré sa nachádzajú na osiach trojstenu v referenčnom SS, čím získame tri identické body medzi oboma SS. Problém je zjednodušený predpokladom, že roviny sú navzájom kolmé a hľadáme body priamo na osiach referenčného SS, vďaka čomu hľadáme pre bod X_1 len súradnicu X_{Ref}, pre bod Y_1 súradnicu Y_{Ref} a pre bod Z_1 súradnicu Z_{Ref}. Súradnice získame pomocou vzdialeností d_{X1Z1}, d_{Y1Z1}, d_{X1Y1} medzi bodmi X_1, Y_1 a Z_1 , pričom tieto vzdialenosti sú vyjadrené priamo ich referenčnými súradnicami pomocou Pytagorovej vety (5). Týmto dostaneme tri rovnice o troch neznámych, ktorých riešením získame výpočet jednotlivých súradníc na základe vzdialeností medzi nimi (6). Vzdialenosti medzi bodmi X_1, Y_1 a Z_1 sú vypočítané pomocou ich súradníc v SS LiDARu, pretože ich vzdialenosti v dvojrozmernom priestore (v SS LiDARu) nám predstavujú priamo vzdialenosť v trojrozmernom priestore (v referenčnom SS).

$$\begin{aligned} d_{X1Z1}^2 &= X_{Ref}^2 + Z_{Ref}^2 \\ d_{Y1Z1}^2 &= Y_{Ref}^2 + Z_{Ref}^2 \\ d_{X1Y1}^2 &= X_{Ref}^2 + Y_{Ref}^2 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} X_{Ref}^2 &= \frac{d_{X1Z1}^2 + d_{X1Y1}^2 - d_{Y1Z1}^2}{2} \\ Y_{Ref}^2 &= \frac{d_{Y1Z1}^2 + d_{X1Y1}^2 - d_{X1Z1}^2}{2} \\ Z_{Ref}^2 &= \frac{d_{X1Z1}^2 + d_{Y1Z1}^2 - d_{X1Y1}^2}{2} \end{aligned} \tag{6}$$

V poslednom štvrtom kroku je vypočítaná rotácia a translácia SS LiDARu do referenčného SS. Výsledkom druhého kroku sú 2D súradnice a výsledkom tretieho kroku sú 3D súradnice identických bodov. Na základe identických bodov v rôznych SS a priestorovej podobnostnej transformácii sú určené transformačné parametre medzi dvojicou SS. Výslednou rotáciou a transláciou bolo transformované merané 2D mračno bodov do referenčného SS (Obr. 3).



Obr. 3: Transformované 2D mračno bodov do 3D

2.2 Transformácia medzi dvojicou LiDARov

Popisovaná metóda nevyžaduje žiadne cieľové značky, čo predstavuje výhodu danej metódy, ale využíva trojsten, ktorý predstavuje referenčný SS. Trojsten plní funkciu prepojenia SS LiDARov vďaka tomu, že poznáme transformáciu SS LiDARu do referenčného SS (viď. Kap. 2.1).

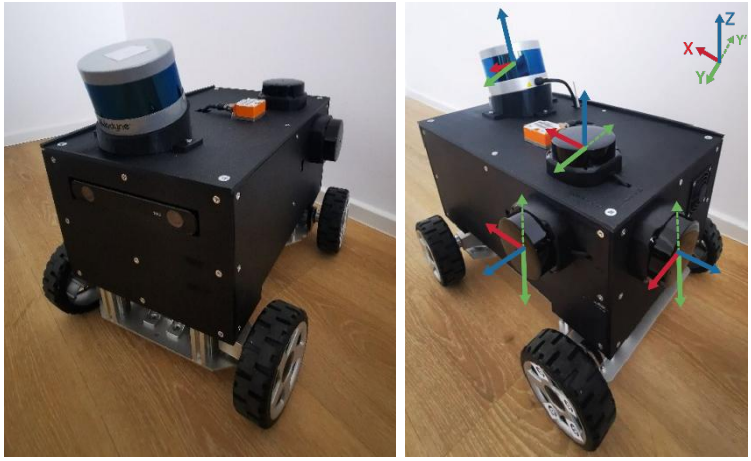
Pri poznaní transformácii dvojice LiDARov do referenčného SS sú pomocou vzorca (2) vypočítané parametre rotačnej matice R_{12} a translačného vektora t_{12}, ktoré predstavujú PVO medzi dvojicou LiDARov. Vypočítanými parametrami dokážeme transformovať body zo SS LiDARu č.2 P_2 do SS LiDARu č.1 P_1 (7).

$$P_1 = R_{12} \cdot P_2 + t_{12} \tag{7}$$

3. Experimentálne meranie

Pre overenie popísanej metódy určenia PVO medzi dvojicou 2D LiDARov bolo vykonané experimentálne meranie. Pre experimentálne meranie bol použitý mobilný mapovací systém (MMS) vyvinutý kolektívom katedry KGDE, Stavebnej fakulty, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

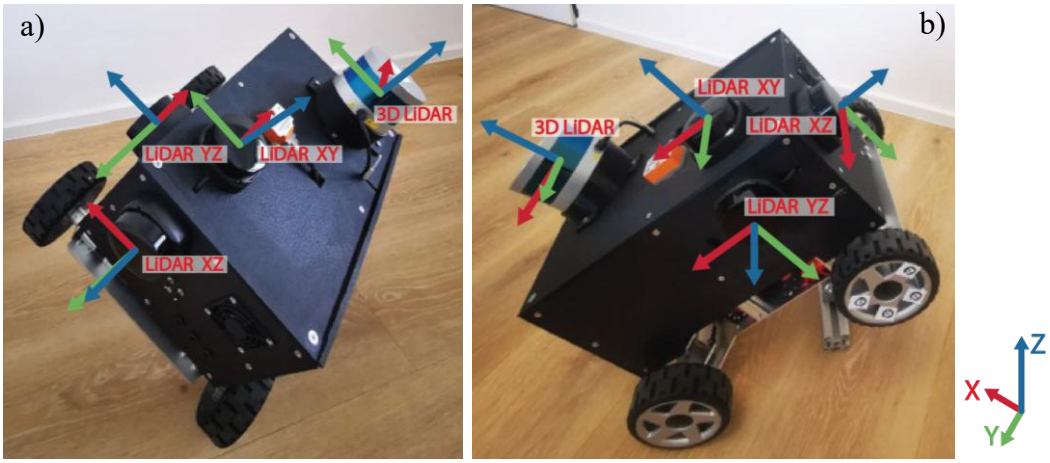
Použitý MMS (Obr. 4) obsahuje trojicu 2D LiDARov RPLIDAR S2L a jeden 3D LiDAR Velodyne Puck VLP-16. Na rozdiel od popisovanej metódy sme určovali PVO medzi 2D LiDARom a 3D LiDARom, kde sme postupne určili transformačné parametre z každého SS 2D LiDARu do SS 3D LiDARu. Keďže použitý 3D LiDAR sa skladá zo šestnástich rovín, ktoré majú definovaný sklon a sú umiestnené nad sebou, tak sme postupovali v spracovaní takmer identicky ako pri 2D LiDARe. Rozdiel v spracovaní je ten, že si vyberieme jednu z rovín 3D LiDARu, ktorá sa nachádza v strede medzi týmito rovinami. Vyselektovanými bodmi pre jednotlivé roviny trojstenu nebola prekladaná regresná priamka, ale použil sa polynóm, pretože vyselektované body netvoria priamku ale krivku. Body v rovine tvoria krivku pri 3D LiDARe, pretože daná rovina skenuje prostredie v tvare kužeľa s jeho vrcholom v počiatku SS 3D LiDARu. Ďalšou úpravou v spracovaní bola matematická úprava osí RPLIDARov. Keďže Velodyne používa pravotočivý SS (Obr. 4 XYZ) a RPLIDARy ľavotočivý SS (Obr. 4 XY`Z), tak bol matematicky zmenený SS RPLIDARov na pravotočivý (Obr. 4 XYZ), aby sme používali jednotnú orientáciu osí.



Obr. 4: Použitý MMS

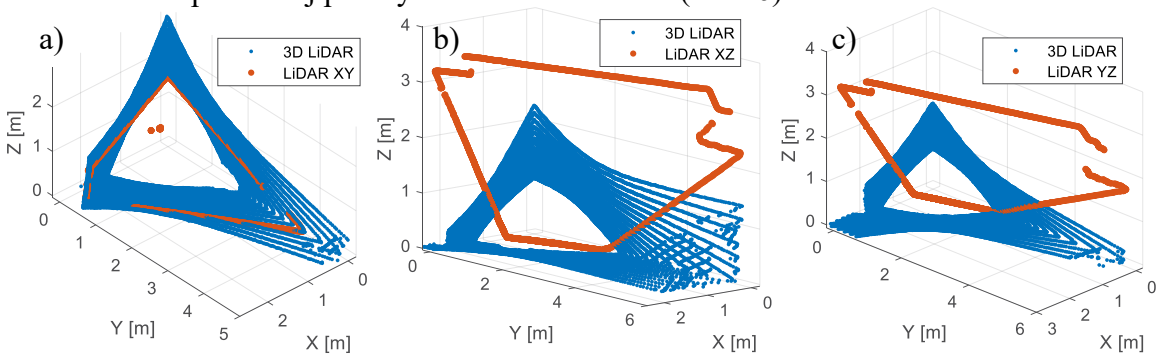
Experimentálne meranie bolo vykonané v kancelárii katedry KGDE, kde nám trojsten predstavoval roh miestnosti. Experiment sa skladal z merania v dvoch rôznych polohách. V prvej polohe boli určené PVO LiDARu YZ (Obr. 5a) a v druhej polohe LiDARu XZ (Obr. 5b) voči 3D LiDARu. Pre LiDAR XY je možné určiť PVO voči 3D LiDARu v oboch polohách, pričom bola

zvolená prvá poloha (Obr. 5a). Označenie 2D LiDARov vychádza z ich umiestnenia v rovinách SS MMS. V každej polohe bolo zaznamenané mračno bodov z 2D aj 3D LiDARu.



Obr. 5: Zobrazenie polôch kalibrácie 3D LiDARu a 2D LiDARov YZ/XY (a), XZ/XY (b)

V rámci spracovania meraných mračien bodov sme postupovali podľa kap. 2.1. V každom mračne bodov boli segmentované body pre jednotlivé roviny trojstenu a bola nimi preložená regresná priamka. Na priesečníku týchto priamok nám vznikol bod, ktorý sa nachádza na osi referenčného SS. K 2D identickým bodom boli dopočítané 3D identické body, na základe ktorých bola vypočítaná transformácia do referenčného SS. Pomocou transformačných parametrov bolo transformované 2D aj 3D mračno bodov príslušnej polohy do referenčného SS (Obr. 6).

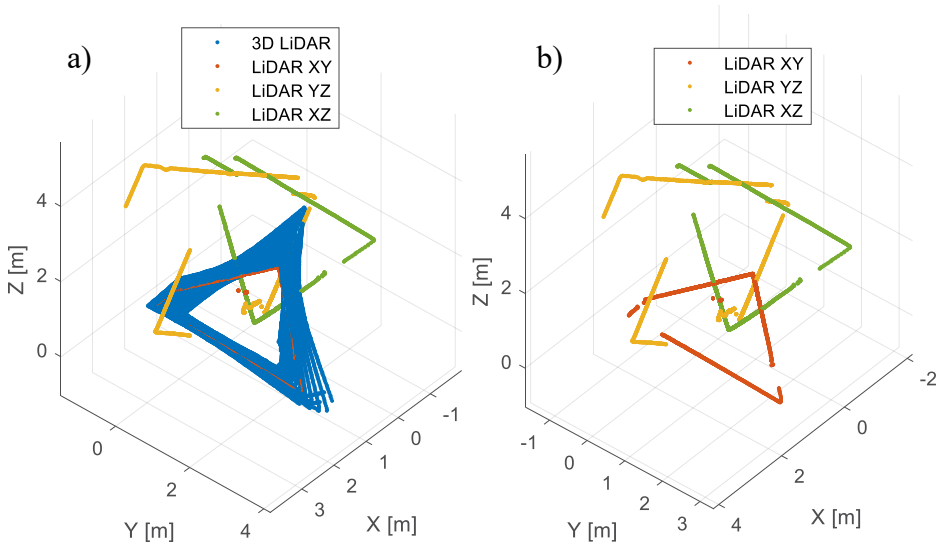


Obr. 6: Zobrazenie transformovaných mračien bodov pre jednotlivé polohy 3D LiDARu a 2D LiDARu XY (a), XZ (b) a YZ (c)

Poslednou časťou spracovania je výpočet PVO medzi 3D LiDARom a príslušným 2D LiDARom. V predchádzajúcej časti spracovania boli vypočítané rotačné matice a translačné vektory pre transformáciu mračien bodov do referenčného SS. Pomocou nich boli vypočítané PVO, rotácie a translácie, medzi LiDARmi pomocou vzorca (2). Výsledné PVO slúžia na transformáciu dát zo SS 2D LiDARu do SS 3D LiDARu (Tab. 1). Pre vizuálnu kontrolu určenia PVO boli vykreslené transformované dáta 2D LiDARov v SS 3D LiDARu spolu s jeho dátami (Obr. 7a).

Tabuľka 1: Výsledné PVO medzi 3D LiDARom a príslušným 2D LiDARom.

Z -> Do	Rotácie			Translácie		
	X [°]	Y [°]	Z [°]	X [m]	Y [m]	Z [m]
LiDAR XY -> 3D LiDAR	0,889	-14,508	-1,851	-0,229	0,100	-0,090
LiDAR XZ -> 3D LiDAR	-106,016	-0,883	89,338	-0,321	0,097	-0,209
LiDAR YZ -> 3D LiDAR	-89,791	-15,823	0,196	-0,202	0,208	-0,177



Obr. 7: Vykreslenie transformovaných 2D mračien bodov do 3D mračna bodov: a) s 3D LiDARom b) bez 3D LiDARu

Pri vizuálnej kontrole správnosti určenia PVO LiDARov (Obr. 7a) môžeme vidieť, že dáta 2D LiDARov vytvárajú priesečník s dátami 3D LiDARu, ktoré reprezentujú roviny trojstenu. Pre lepšiu kontrolu 2D LiDARov boli z Obr. 7a odstránené dáta 3D LiDARu (Obr. 7b), kde sme skontrolovali vzájomné prieniky 2D mračien bodov. Ak sú všetky tri 2D LiDARy správne natransformované, tak napríklad 2D mračno bodov LiDARu XY pretína LiDAR XZ v dvoch bodoch a tiež LiDAR YZ v dvoch bodoch. Celkovo musí byť 2D mračno bodov pretínané v štyroch bodoch. V prípade, že by sa v jednom z bodov nepretínali, tak by to bol signál zlého určenia PVO LiDARov.

4. Záver

Článok sa venuje problému určeniu PVO medzi trojicou 2D LiDARov a 3D LiDARom. Problém vychádza z použitia viacerých snímačov na jednej mapovacej platforme, kde každý snímač meria svoje dáta vo vlastnom SS. Pri spájaní jednotlivých snímačov bez použitia PVO bude dochádzať k ich nesúladu. Určenie PVO sa preto stáva dôležitou súčasťou pri vývoji mapovacích systémov.

V článku sa venujeme transformácii medzi trojicou 2D LiDARov RPLIDAR S2L a jedného 3D LiDARu Velodyne Puck VLP-16. Cieľom je vypočítať PVO pre transformáciu dát zo SS 2D LiDARov do SS 3D LiDARu. Keďže transformácia 2D LiDARov je zložitejšia kvôli absencii výškovej zložky, tak bol využitý trojsten, ktorý obsahuje dve vertikálne roviny (steny) a jednu horizontálnu rovinu (podlahu).

Celý postup určenia PVO sa skladá z dvoch krokov a vždy sa transformuje SS jedeného 2D LiDARu do SS 3D LiDARu. V prvom kroku je potrebné vypočítať transformáciu 2D/3D mračna bodov do referenčného SS trojstenu. To je zabezpečené nájdením identických bodov v meranom mračne bodov a následným výpočtom identických bodov v referenčnom SS. Po transformovaní 2D/3D mračien bodov do referenčného SS je z rotačných matíc a translačných vektorov vypočítaná transformácia zo SS 2D LiDARu do SS 3D LiDARu, ktorá predstavuje PVO.

V ďalšej práci sa budeme venovať určeniu PVO medzi ďalšími snímačmi na MMS. Zjednotenie všetkých snímačov je nevyhnutné kvôli ich fúzii pri určovaní polohy. Každý snímač určuje polohu vzhľadom k svojmu počiatku SS a pri spájaní rôznych dát bez ich transformácie do spoločného SS by vznikali viditeľné rozdiely medzi nimi. Preto je potrebné merania transformovať do spoločného SS. Na MMS sa ešte nachádza stereokamera, inerciálna meracia jednotka a dvojica snímačov otáčok, pre ktoré je potrebné určiť vzájomnú polohu ich SS so SS 3D LiDARu.

Poďakovanie

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

„Táto práca bola podporená v rámci Programu na podporu mladých výskumníkov s názvom: Inovácia konštrukcie nízko-nákladového mobilného mapovacieho systému“.

Literatúra

[1] DROESCHEL, D. et al.: Continuous mapping and localization for autonomous navigation in rough terrain using a 3d laser scanner. *Robot. Auton. Syst*. 2017, roč. 88, s. 104–115.

[2] GAO, C. et al.: Research on a panoramic mobile robot for autonomous navigation. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology (ICMEIT 2019)*. Dalian, China, 2019, s. 204-207. ISBN 978-94-6252-708-9.

[3] ENDRES, F. et al.: Unsupervised discovery of object classes from range data using latent Dirichlet allocation. In: *Robotics: Science and Systems V*. Seattle: University of Washington, 2009, ISBN 978-0-262-51463-7.

[4] SURMANN, H. et al.: An autonomous mobile robot with a 3d laser range finder for 3d exploration and digitalization of indoor environments. *Robot. Auton. Syst*. 2003, roč. 45, č. 3-4, s. 181–198.

[5] COLE, D. M. – NEWMAN, P. M.: Using laser range data for 3D SLAM in outdoor environments. In: *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation.* Orlando, 2006, s. 1556-1563. ISBN 0-7803-9505-0.

[6] XIE, G. et al.: Online active calibration for a multi-lrf system. In: *Proceedings of the 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems.* Las Palmas, 2015, s. 806-811. ISBN 978-1-4673-6596-3.

[7] ABANAY, A. et al.: A calibration method of 2D LIDAR-Visual sensors embedded on an agricultural robot. *Optik*. 2022, roč. 249.

[8] TÓFALVI, T. et al.: Calibration of 2D LiDAR sensors using cylindrical target. In: *BMVC*. Glasgow, 2024.

[9] HE, M. et al.: Calibration method for multiple 2d lidars system. In: *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Hong Kong, 2014, s. 3034-3041. ISBN 978-1-4799-3685-4.

[10] ZHU, F. et al.: Extrinsic calibration of multiple two-dimensional laser rangefinders based on a trihedron. *Sensors*. 2020, roč. 20, č. 7.

[11] HU, Z. et al.: Extrinsic calibration of 2-d laser rangefinder and camera from single shot based on minimal solution. *IEEE Trans. Instrum. Meas*. 2016, roč. 65, č. 4, s. 915–929. ISSN 0018-9456.

[12] FAN, J. et al.: Extrinsic Calibration between a Camera and a 2D Laser Rangefinder using a Photogrammetric Control Field. *Sensors*. 2019, roč. 19, č. 9.

Natália Faboková[1]
Študijný program: Geodézia a kartografia, 2. ročník

VODA A KATASTER NEHNUTEĽNOSTÍ

WATER AND REAL ESTATE CADASTRE

Abstract
Water and water areas are an important part of the landscape. Since the first maps were created, these features have been measured and drawn. Over time, not only has the way we map water features changed, but also how we view them from a legal or ownership perspective. Many questions related to water and the real estate cadastre are currently emerging. These include the recording of water in maps, the regularity of map updates, ownership issues, and the future of recording. This article describes the evolution of water registration in the real estate cadastre and discusses current issues that are being addressed in many countries. At the same time, it attempts to highlight the importance of registering these elements in the real estate cadastre.

Kľúčové slová / Key Words
Vodné toky; kataster nehnuteľností; pozemky a vlastníctvo; zelený kataster

1. Úvod

Vodné toky a vodné plochy sú často prehliadané v súvislosti s pozemkovým vlastníctvom. Evidencia tak ako ju poznáme dnes sa vyvíjala dlhé roky. Dnešné mapové podklady a evidencie majú svoje základy v období Rakúsko-Uhorska. Súčasné mapy teda obsahujú nielen aktuálne informácie, ale nachádzajú sa v nich aj stopy ich vývoja. Z toho plynie aj mnoho problémov a komplikácií súčasnosti.

Súčasnosť taktiež pridáva legislatívne a praktické problémy. Od prekrývania práv a povinností medzi správcami vody a vlastníkmi okolitých pozemkov, cez hranice rôzneho druhu na vodných dielach alebo vodných tokoch. Problematika hraníc sa nevzťahuje výslovne len na vnútorné hranice rozdeľujúce jednotlivé pozemky, ale aj na štátne hranice. V tomto kontexte sú definované tzv. pohyblivé alebo pevné hranice, ktoré dynamickosť vody príslušne riešia.

Pri riešení súčasných problémov je potrebne myslieť aj na budúcnosť evidencie. Aktuálne sa dostávajú do popredia témy zeleného katastra, ktorý by evidoval prírodné prvky v krajine. Je preto na zamyslenie, či by v jeho konceptoch nemohlo byť miesto aj pre vodné toky a vodné plochy. Ako príklad môžeme uviesť výskum morského katastra, ktorý je v dnešnej dobe čím ďalej tým viac spomínaný.

2. Historický pohľad

Po zrušení poddanstva začalo evidovanie vlastníckych práv vo verejných knihách. Zmena z poddaného na vlastníka bol komplikovaný a zdĺhavý proces. Práva, nároky a spôsoby evidovania sa postupom času menili a upravovali. Niektoré prvky krajiny však boli neprivlastniteľné. Slúžili totižto

[1] Natália, Faboková, Ing., Katedra geodézie, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

všetkým, teda patrili celej verejnosti. Išlo napríklad o cesty, námestia, rieky, prístavy a pod. Verejný majetok, ktorý nepodliehal osobnému vlastníctvu, sa do pozemkovej knihy nezapísal. Údaje a práva o vodných prvkoch krajiny mohli byť z dôvodu ich spravovania zaznamenané vo vodnej knihe. Zápisy obsahovali právne nároky na užívanie vody a práva vzťahujúce sa na vodné toky a nádrže. Vodné knihy zakladané po roku 1885 však neudávali druh vodného oprávnenia, predstavovali iba evidenčné pomôcky. Pozostávali z knižnej vložky, vodnej mapy, zbierky listín a plánov. Spolu s vodnými knihami vyšiel aj zákonný článok XXIII/1885, ktorý bol neskôr nahradený zák. čl. XVIII/1913, teda zákonom o vodnom práve [1], [2].

Tvorba máp sa do roku 1927 riadila dobovými predpismi, ako napríklad Instruction für mesztischaufnahmen (pre územie Rakúska) alebo Utasítás az országos kataszteri felmérés végrehajtására (pre územie Uhorska). Inštrukcie podrobne popisovali, merané prvky spojené s vodnými tokmi a vodnými plochami. Riešené boli brehy vodných tokov, križovanie s komunikáciami a jednotlivé prvky merateľné na vodných tokoch alebo na vodných plochách. Mapy z tohto obdobia mohli mať farebné prevedenie, pričom voda bola vo všeobecnosti vykreslená modrou farbou. Popisy mali čiernu farbu, pričom na katastrálnych mapách z tohto obdobia prevládali jazyky ako maďarčina, latinčina alebo nemčina [3], [4].

V roku 1925 bolo vydané vládne nariadenie č. 161/1925, ktorým sa upravovalo zariadenie a vedenie vodných kníh so zbierkami listín, máp a plánov pre Slovensko a Podkarpatskú Rus. Od roku 1927 vstúpili do platnosti Inštrukcia A a Inštrukcia B. Tieto predpisy definovali meranie vodných tokov a vodných plôch. Menovite ďalej definovali prvky merania, ako náhony, priehrady, vzdúvacie zariadenia, priepusty pre vory, plavidlové komory, stavby pre kanalizovanie riek, prieplavy, prístavy, zahradzovacie a ochranné stavby, stavby pre úpravy vodotokov. Samostatne bolo riešené aj evidovanie a zakresľovanie vodných tokov, ktoré boli prekryté, alebo nebolo možné určiť ich jednoznačný priebeh. Vodné toky a vodné plochy boli vo farebných náčrtoch zakresľované svetlou berlínskou modrou farbou a popisy a značky boli vyznačované čiernou farbou [1], [5], [6], [7].

Občiansky zákonník z 25. októbra 1950 v §102 a §119 odkazoval na prechod všetkého vlastníctva národného majetku na socialistický štát. Na socialistický štát taktiež prechádzalo všetko, čo nepatrilo nikomu. Pozemky pokryté vodou boli postupne upravované ďalšími zákonmi ako napríklad zákonom č. 11/1955 Zb. o vodnom hospodárstve, vládnym nariadením č. 14/1959 Zb. o vodnom hospodárstve alebo ústavným zákonom 100/1960 Zb., ktorý vyhlásil vodné toky a prírodné liečivé pramene za národný majetok. V roku 1964 vyšiel zákon č. 22/1964 Zb. o evidencii nehnuteľností, jeho vykonávacia vyhláška č. 23/1964 Zb. a občiansky zákonník č. 40/1964, ktoré zrušil predpisy o verejných knihách a začal sa vykonávať nový spôsob evidencie vlastníckych vzťahov k nehnuteľnostiam. Pozemkové knihy sa však v niektorých prípadoch používali naďalej. Dochádzalo taktiež k zosúvislovaniu, vyrieďovaniu a stotožňovaniu hraníc. Drobné a neplodné plochy znázorňované na katastrálnych mapách len približne bez parcelných čísel a pozemky na ktorých sa nachádzali disponovali viacerými kultúrami. Mapy z tohto obdobia boli jedno farebné, no mohli by sme nájsť mapy v čiernom, sépiovom alebo modrom prevedení.[1], [8], [9], [10]

Zákon o evidencii nehnuteľností bol zrušený až v roku 1992, a to zákonmi č. 265/1992 (o zápisoch vlastníckych a iných vecných práv k nehnuteľnostiam) a 266/1992 (o katastri nehnuteľností v Slovenskej republike). Týmito zákonmi boli súčasťou katastrálneho operátu podľa §5 aj pozemkové a železničné knihy (v podobe archívnych dokumentov s trvalou dokumentárnou hodnotou). V súčasnosti je platný zákon č. 162/1995, v ktorom sú pozemkové knihy, železničné knihy a ich operáty stále archívnymi dokumentami s trvalou dokumentárnou hodnotou. Banské ani vodné knihy ale neboli ako archívne dokumenty v zákonoch zavedené [8].

Dokument, ktorý by jednoznačne definoval merania vodných tokov pre potreby katastra v súčasnosti neexistuje. Všeobecne sú predmetom meračských prác mimo iného hranice katastrálneho územia, hranice pozemkov, stavby, hranice chránenej nehnuteľnosti alebo inej skutočnosti a jej ochranného pásma a rozsah vecného bremena. Aj z tohto dôvodu vznikajú nesúlady a nejasnosti v

tom, čo všetko je potrebné merať a zaznamenávať v súvislosti s vodnými tokmi. Niektoré konkrétne príklady sú rozobraté v nasledovných kapitolách.

3. Evidovanie vody – legislatívne a praktické problémy

Aj na základe bohatej histórie vývoja katastra a evidencií na území dnešného Slovenska, nie je evidovanie vodných tokov tak jednoduché akoby sa na prvý pohľad mohlo zdať. Vyvstáva mnoho praktických otázok, ktoré nie sú zákonne ošetrené, čo má na svedomí nezrovnalosti medzi jednotlivými inštitúciami. V nasledovných kapitolách sú načrtnuté niektoré postrehy, nezrovnalosti alebo otázky, ktoré sú v ponímaní evidovania vodných tokov a vodných plôch pozoruhodné alebo zaujímavé.

3.1 Definovanie vlastníctva, práva a povinnosti

Podľa ústavy, čl. 4 Ústavy Slovenskej republiky (zákon 460/1992) sú podzemné vody, prírodné liečivé zdroje a vodné toky sú vo vlastníctve Slovenskej republiky. Definovanie vodného toku a jeho koryta je uvedené v §43 ods. 1 a ods. 2. zákona č. 364/2004 a práve v týchto definíciách nastávajú z pohľadu katastra nehnuteľností a vlastníctva problémy. Podľa týchto predpisov by sme mohli povedať, že vodný tok (ktorý vlastní Slovenská republika) nie je len samotná voda, ale aj jej koryto. Koryto vodného toku môže byť buď pozemok po ktorom preteká vodný tok a má uvedený spôsob využitia vodný tok. Druhý prípad je pokiaľ je spôsob využitia iný a v takom prípade je korytom pozemok tvoriaci dno a brehy v ktorých odtekajú vody až po brehovú čiaru. Teda by vodný tok spolu s korytom (čo by mohla byť časť pozemku alebo celý pozemok) mali byť vo vlastníctve Slovenskej republiky. [11], [12]

Samostatnou „kapitolou“ sú vodné toky v lesných porastoch. Tie často nie sú evidované v katastri nehnuteľností, hlavne pokiaľ sa jedná o malý vodný tok. Dôvodom je, že takéto prípady spadajú pod §3 zákona 326/2005, kde je lesný pozemok aj pozemok, ktorý je bez lesného porastu ale jeho užívanie súvisí s funkciou lesa. [13]

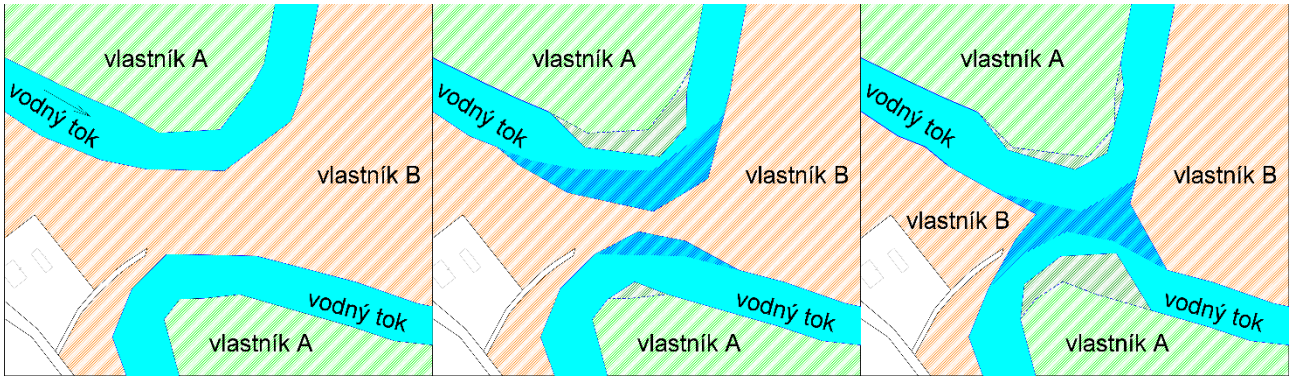
Jednou z povinností správcov vodného toku je podľa §45 zákona 364/2004 povinný vrátiť vodný tok do pôvodného koryta ak je nové koryto umiestnené na pozemkoch v inom ako štátnom vlastníctve a vlastník pozemku o to požiadal (v lehote do troch rokov od zmeny). Zároveň má správca vodného toku podľa §49 zákona 364/2004 oprávnenia pri správe vodných tokov. Ide napríklad o vstupovanie na cudzie nehnuteľnosti v nevyhnutnom rozsahu, odstraňovanie alebo novo vysádzanie stromov a krov na pobrežných pozemkoch, ťaženie riečneho materiálu z koryta v rozsahu správy vodného toku, atď.. Zároveň sú definované aj pobrežné pozemky ako pozemky do 5 m alebo 10 m od brehovej čiary (v závislosti na veľkosti toku). Teda časť pozemku pri vodnom toku je aj pobrežný pozemok. Vlastník pobrežného pozemku má taktiež svoje povinnosti voči vodnému toku, ako napríklad umožniť správcovi vodného toku výkon jeho oprávnenia, dbať o ochranu vôd, umožniť za náhradu umiestnenie a prevádzku meracích zariadení, atď.. [12]

3.2 Znehodnotenie parciel

Ako už bolo spomenuté vodný tok môže zmeniť svoj smerový priebeh. Jedná sa o prirodzenú vlastnosť vodných tokov. Naše „umelé“ alebo „fiktívne“ predstavy o vlastníckych hraniciach voda ako taká nerešpektuje. Časť riešenia takéhoto prípadu už uvedená bola v predchádzajúcej podkapitole, podľa zákona. Regulovanie, respektíve sledovanie, či vodný tok zmenil svoj tvar je ponechané na vlastníkov pozemkov. Pokiaľ je zmena postupná v priebehu niekoľkých rokov je možné, že vlastník si zmeny vedomí, nie je. Vzhľadom na charakter vody dochádza na niektorých pozemkoch k erózii, a na niektorých k hromadeniu nánosov. Takéto „naprávanie“ toku do jeho

pôvodného koryta môže byť teda veľmi náročné. Mohli by sme „namietať“ upravenými vodnými tokmi, kde je koryto a smerový priebeh kompletne regulovaný a pod kontrolou. V takýchto prípadoch si je ale potrebné uvedomiť, že nie každý jeden vodný tok môže byť takto upravený (či už z ekonomického alebo ekologického hľadiska). Vodné toky vždy menili a vždy aj budú meniť svoj tvar a je teda len na nás ako s týmto faktom vysporiadame. Realitu situácie komplikuje aj to, že veľké množstvo hlavne drobných vodných tokov nie je evidovaných v katastri nehnuteľností. Niektoré nie sú evidované vôbec, iné síce sú, ale parcely nemajú založený C-LV a sú križované parcelami s E-LV [14].

Pri zmene priebehu koryta môže vzhľadom k okolitým parcelám vzniknúť niekoľko druhov situácií. Základný príklad, s ktorým sa spája niekoľko problémov je na obrázku 1 . Vodný tok má svoj priebeh, ale časom erózia a sedimentácia vytvorí meandre. Tie sa postupne zväčšujú, ako je uvedené na obrázku, až postupne dôjde k vytvoreniu ostrovu. Tento prírodný jav spôsobí, že vlastník A získa k svojmu pozemku ďalšiu pôdu, ale vlastník B pôdu stratí. Zároveň sa vlastníkovi B vytvorí situácia, kedy nemám prístup k „odrezanej“ časti pozemku a nemôže ho efektívne obhospodarovať. To, že dochádza na pozemkoch k erózii spôsobenej vodou, znižuje ich hodnotu a fakt, že časť pozemku je prakticky neprístupná vlastníkovi B dodatočne cenu pozemku znižuje.[15]



Obrázok 1: Zmena tvaru vodného toku a vplyv na okolité pozemky - schéma

3.3 Hranice na veľkých vodných dielach a vodných tokoch

Pri veľkých vodných dielach ako sú priehrady môžeme pozorovať, že hranice sú pomerne komplikované línie vedúce cez vodnú plochu. Celé vodné dielo je „rozdelené“ k jednotlivý konkrétnym katastrálny územiam (k.ú.), ktoré ho obklopujú alebo sa v ňom nachádzajú. Tieto prípady vychádzajú z historického kontextu, z obdobia, kedy sa vodná plocha na danom mieste nenachádzala. Ako príklady môžeme spomenúť Vodné nádrže Orava, Liptovská Mara, Zemplínska šírava alebo Kráľová. Vizuálne si to môžeme porovnať na obrázku 2. Súčasné hranice stále kopírujú objekty a cesty, ktoré sa na danom mieste nachádzali v minulosti. Samostatným prípadom je napríklad k.ú. Parížovce, ktoré pozostáva len z 11 parciel, ktoré všetky disponujú kódom druhu pozemku 11, teda vodná plocha.

V úvode bolo naznačené, že hranice na vodných tokoch a vodných plochách môžu spôsobovať problémy. Hranice na vodných tokoch a plochách sú vyznačované nepriamo. Často pomocou nepriameho označenia dvojice bodov na brehoch. Stred ich spojnice následne predstavuje danú hranicu. Tento postup sa používa hlavne pri definovaní štátnych hraníc na vodných tokoch a plochách.

Obrázok 2: Zobrazenie hraníc k.ú. na ortosnímkach (vľavo okolo roku 1950, vpravo rok 2010) (zdroj: Historická ortofotomapa © GEODIS SLOVAKIA, s.r.o. a Historické LMS © Topografický ústav Banská Bystrica. Ortofotomapa © EUROSENSE, s.r.o. a GEODIS SLOVAKIA, s.r.o. [16])

4. Budúcnosť evidovania

4.1 Zelený kataster

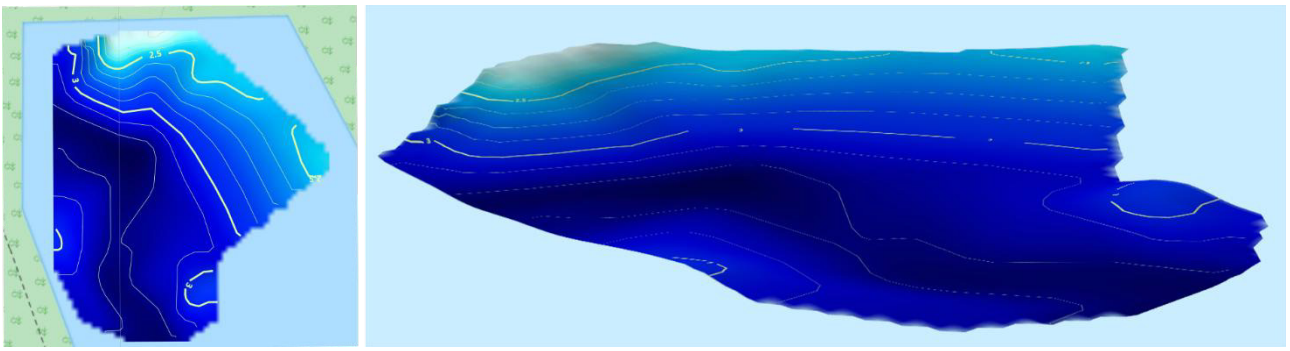
Jednou z otázok je budúcnosť evidovania vody v katastri nehnuteľností. Jednou z možností je koncept zeleného katastra, ktorý sa čím ďalej tým viac dostáva do povedomia. Celý koncept vzniká pre rozšírenie evidovania „zelených“ prvkov v krajine. Pod zelenými prvkami sa zvyčajne myslia lesy, lúky alebo mestská zeleň. Všeobecne ale ide o evidovanie prírodných prvkov krajiny, ktoré vo veľkej časti prípadov nie sú evidované dostatočne. Je otázne, či by nebolo vhodné, aby bola v tomto koncepte venovaná pozornosť aj „modrým“ prvkom v krajine. Voda, respektíve moria sú riešené v morskom katastri, ktorý môžeme brať ako ekvivalent katastra pre moria. Zakomponovanie vody do zeleného katastra, alebo vytvorenie samostatného „modrého katastra“ by mohlo prispievať, podobne ako pri morskom katastri, k rastu modrej ekonomiky, turizmu alebo nerastným zdrojom. Ku konceptu morského katastra prispieva množstvo odborníkov s výskumami. Riešené sú nielen otázky pohyblivých hraníc, ale aj práv a povinností spojených s vodou. [17], [18]

Keďže sa z veľkej časti jedná o koncepty, môžeme hovoriť o dvoch prístupoch k tejto problematike. Otázkou je, akoby sme tento koncept riešili na území Slovenska. Teoreticky máme dva základné prístupy, ktoré by mohli byť aplikované. Prvá možnosť je rozšíriť, čo všetko eviduje kataster v súčasnosti a pridať aj do katastrálnych máp nové vrstvy, ktoré by zobrazovali zelené a modré prvky v krajine. Druhá možnosť je vytvorenie samostatného systému, ktorý by bol prepojiteľný so systémom katastra.

Ak by sme sa priklonili k prvej možnosti, znamenalo by to aktualizovanie tejto vrstvy katastrom pomocou podkladov poskytnutých geodetmi. Bola by tak zabezpečená správnosť, presnosť a spoľahlivosť dát. Avšak pre „naplnenie“ takejto novej vrstvy by bolo potrebné veľké množstvo času a zdrojov, teda by bola vytváraná postupne. Výhoda druhej možnosti je vytvorenie databázy, ktorá bude korešpondovať s najmodernejšími technológiami a medzinárodnými štandardami. Zabezpečila by sa tak medzištátna nadväznosť údajov. Otázne by bolo, kto by takúto databázu spravoval, aktualizoval, s akými podmienkami a akou prepojiteľnosťou s naším súčasným katastrom.

4.2 Evidované skutočnosti

Bez ohľadu na to, akým smerom by sme sa pri evidovaní vodných prvkov pustili, je ešte otázne čo všetko budeme evidovať. Každá databáza, by bola zložená z priestorových informácií a atribútov. Pokiaľ ide o priestorové informácie, do budúcna by sa mohlo jednať nielen o polohu vodného objektu v rovinných súradniciach, ale aj o informácie týkajúce sa výšky. K takémuto prístupu by mohli byť využité napríklad merania sonarmi, ktoré by boli prepájané s ostatnými informáciami. Všetky tieto informácie zhromaždené na jednom mieste by boli využiteľné naprieč rôznymi inštitúciami, ktoré pracujú z vodnými tokmi a plochami. Jednoduchý výstup, ktorý bol vyhotovený na základe merania dna je zobrazený na obrázku 3.



Obrázok 3: Model dna

Atribúty alebo popisné údaje k jednotlivým objektom by mohli byť viazané na identifikátory. Napríklad pri vodných tokoch by mohlo ísť o hydrologické poradie, resp. o číslo hydrologického povodia. Na základe identifikátorov by bol každý objekt prepojený nielen s jeho priestorovou reprezentáciou ale aj informáciami s rôznych rezortov, ktoré sa akýmkoľvek spôsobom vzťahujú k danému objektu.

5. Záver

V súčasnosti evidovanie vodných tokov a plôch v katastri nehnuteľností nenapĺňa svoj úplny potenciál, a to od samotného mapovania až po evidovanie informácií vodných prvkoch krajiny. Zákony síce definujú evidenciu o vodách, avšak prepojenie týchto evidencií nie je na prvý pohľad viditeľné. Zároveň sú opomínané nielen nezrovnalosti v interperetáciách zákona, ale aj problémy spájajúce sa s prirodzenými zmenami priebehu vodných tokov a vodných plôch v čase. Zároveň je problematická otázka vlastníctva v prípadoch s prirodzenou zmenou vodných prvkov.

Samostatná problematika je evidovanie vodných prvkov v budúcnosti. Otázkou je, či budeme postupne ďalej rozširovať existujúcu databázu, alebo sa obrátime na moderné technológie a štandardy, pri vytváraní doplnkového systému. Ten by eventuálne bol kompatibilný a prepojiteľný ako so súčasným systémom, tak s najmodernejšími technológiami a štandardmi súčasnosti.

Poďakovanie
„Tento článok vznikol vďaka podpore Fondu Slavojovcov.“

Literatúra

[1] J. Kukučka, “Právne aspekty usporiadania pozemkového vlastníctva”, Bratislava: AGRICONSULTING BRUSSELS – VVMZ NITRA AGROINŠTITÚT NITRA 1998, jan. 1998.

[2] P. Gajdošová, "Pozemkové právo a kataster nehnuteľností", Bakalárska práca, Bankovní institut vysoká škola Praha, Banská Bystrica, 2012. Cit: 22. november 2024. [Online]. Available at: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://is.ambis.cz/th/fw5v4/plna_verzia_bakalarskej_prace.pdf
[3] *Utasítás az országos kataszteri felmérés végrehajtására*, roč. 1904. 1904, s. 143. Cit: 20. október 2025. [Online]. Available at: https://www.catastrum.hu/docs/Utasitas_1904_web.pdf
[4] *Instruktion für mesztischaufnahmen*. 1907.
[5] *Sbírka zákonů a nařízení státu československého*, roč. 1925. 1925, s. 777–788.
[6] *Inštrukcia A*, roč. 1953. 1939.
[7] *Inštrukcia B*, roč. 1960. 1932.
[8] J. Marek, *Pohľad do histórie katastra na Slovensku*, Prvé vydanie. Slovenská spoločnosť geodetov a kartografov, 2010.
[9] M. Štefanovič, *Pozemkové právo*, 1. vydanie. Príroda, vydavateľstvo kníh a časopisov, n.p., Bratislava, 1971.
[10] *Smernica pre vedenie meračských operátov JEP*, roč. 1959.
[11] "460/1992 Zb. - Ústava Slovenskej republiky". Cit: 30. september 2025. [Online]. Available at: https://www.slov-lex.sk/ezbierky/pravne-predpisy/SK/ZZ/1992/460/20250101.html
[12] "364/2004 Z.z. - Zákon o vodách a o zmene zákona Slovenskej národnej rady č. 372/1990 Zb. o priestupkoch v znení neskorších predpisov (vodný zákon)". Cit: 30. september 2025. [Online]. Available at: https://www.slov-lex.sk/ezbierky/pravne-predpisy/SK/ZZ/2004/364/20250401.html
[13] "326/2005 Z.z. - Zákon o lesoch". Cit: 30. september 2025. [Online]. Available at: https://www.slov-lex.sk/ezbierky/pravne-predpisy/SK/ZZ/2005/326/20251230.html
[14] "Hydrografie vodních toků | Klimatologie a hydrogeografie pro učitele | Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity". Cit: 01. október 2025. [Online]. Available at: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/08-hydrografie.html#povodi
[15] P. Hanus a P. Benduch, "Technical aspects and consequences of establishing the shoreline in Poland", *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, roč. 116, č. 1, s. 85–92, dec. 2023, doi: 10.2478/rgg-2023-0014.
[16] "HOFM SK". Cit: 22. október 2025. [Online]. Available at: https://mapy.tuzvo.sk/hofm/
[17] E. Balla a R. Wouters, "MARINE CADASTRE IN EUROPE: STATE OF PLAY (NR 355)".
[18] "Cadastre of green areas", GEOINFO. Cit: 22. október 2025. [Online]. Available at: https://geoinfo.mycpanel.rs/wp/en/cadastre-of-green-areas/

Aset Madiev[1]
Study program: Geodesy and Cartography, year: 4.

A SCAN-VS-BIM SOFTWARE SOLUTION

Abstract
The automated verification of as-built building elements is increasingly essential in modern construction, as it directly supports quality control, safety, and compliance with design standards. Existing Scan-vs-BIM approaches, which compare Building Information Modelling (BIM) data with terrestrial laser scanning (TLS) point clouds, have made significant advances in automating geometric inspection. However, many prior works lack in-depth focus on open data formats such as Industry Foundation Classes (IFC) or do not detail practical implementation choices, limiting reproducibility and reusability. This study addresses these gaps by developing and documenting an automated solution for geometric verification of walls and rectangular columns, emphasizing IFC integration and robust, implementation-ready algorithms.
Key Words
Point cloud; Scan-vs-BIM; python.

1. Introduction

Rigorous geometric verification of structural elements is increasingly recognized as a cornerstone of modern construction practice, given its direct influence on safety, durability, serviceability, and overall project quality. Tightened quality-assurance and safety requirements now motivate the adoption of digital inspection methods [1].

Conventional surveying methods are time-consuming, resource-intensive, costly, and susceptible to human error. As a result, Scan-vs-BIM workflows—coupling BIM with TLS—are gaining traction for detecting construction deviations, verifying compliance, and streamlining quality control. A typical pipeline includes (1) TLS acquisition, (2) point-cloud processing and geometry extraction, and (3) deviation analysis between as-built and as-planned models. The most widely used metric is the orthogonal distance from each point to the nearest BIM surface, optionally constrained along a preferred direction such as the building axis [2–5].

Previous studies have extensively explored various aspects of Scan-vs-BIM methods. For instance, Bosché et al. [2] demonstrated the effectiveness of Scan-vs-BIM approaches in automating quality control of cylindrical mechanical, electrical, and plumbing (MEP) elements. Tsige [3] employed deep learning methods for automated segmentation of structural elements, enhancing the robustness and speed of geometric verification. Additionally, O'Keeffe et al. [4] addressed challenges in validating BIM data using automated Scan-to-BIM methods, emphasizing the critical role of precise data alignment and validation techniques. Polat and Ali [5] investigated the "collaboration" between BIM and laser scanning for quality control in building construction, highlighting significant improvements in accuracy and efficiency.

In this paper, we focus on planar structural elements and propose an IFC-guided, plane-based Scan-vs-BIM workflow. For every planar element a center and four corner points are extracted. The center

[1] Department of Surveying, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovakia

point is used to select a seed point from the point cloud, while the corner points are used to compute the face's plane equation.

2. Methodology

The proposed methodology consists of three main steps: as-planned geometry extraction of geometry data from the IFC, segmentation of planar object from point cloud and comparing as-planned (IFC) with as-built (point cloud) models.

As-planned geometry extraction retrieves the coordinates of objects from a BIM model in IFC format. In this format, geometry is defined in local coordinates per element via IfcLocalPlacement and may include axis orientations from profile definitions (such as IfcRectangleProfileDef). Since local axes may differ from project axes, the procedure resolves the entire PlacementRelTo chain to the root, reconstructs the element's axis system (IfcAxis2Placement3D), and converts the coordinates of local vertices to the project coordinate system. Using this transformation, one central and four corner points are calculated for each face or profile instance (including openings and recesses), yielding ordered corner loops, face centers, and corresponding plane equations in project coordinates. The resulting dataset—global corner coordinates, centroids, plane parameters, and the element's GUID—serves as the as-planned input for downstream seeding, segmentation, and deviation mapping.

As-built segmentation combines a modified RANSAC with region growing, following the general scheme in [6]. Surface normals are first estimated for each point; this requires two parameters: a normal search radius and a maximum number of neighbors considered for the estimate. Normals provides local orientation used both in model fitting and in later inlier tests.

Segmentation is seeded by the as-planned geometry: for each face, the seed point is chosen as the closest point from the point cloud to central point of the face. For elements containing voids/openings, seeding is made opening-aware (e.g., selecting a seed in the opening-free support region or on the median plane of the opening via a 2D triangulation), so that growth does not start inside a cavity. Region growing proceeds iteratively. Candidate neighbors are tested against two criteria: distance to the current plane and normal vector deviation. Points passing both criteria are added as inliers, the plane is re-estimated (PCA/SVD), and thresholds are re-applied until convergence or a maximum iteration limit is reached. This conservative gating helps avoid including adjacent but distinct surfaces (e.g., trims or offsets). The output is, for each as-planned face, a subset of inlier points and the corresponding regression-plane parameters (normal and offset), which are then used to compute deviation maps both to the IFC plane and to the best fitted regression plane.

The comparison and visualization of the data involve analyzing the extracted geometry from the BIM model alongside the segmented subsets of the as-built point cloud, leading to the creation of two deviation maps. The first deviation map expresses the distance between as-planned (IFC) and as-built (point cloud) model, for what the general equation of the plane was used. The second deviation map expresses the deviation between the segmented points for the selected plane and the best-fit regression plane – to determine the relative geometric flatness.

3. Results

To demonstrate the effectiveness of the proposed approach BIM model in IFC format and the point cloud data were obtained from an apartment located in the apartment complex Zwirn, Bratislava. The measurement was performed using a Trimble TX 3D laser scanner. The parameters were set as follows: field of view 360^0 Hz, 305^0 V, resolution 1/10, which means that distance between measured

point on the surface is 15.3 mm by 15.3 mm, 3 repetitions of the measured distances. Object was scanned from 5 scanner positions. Further, all scans were registered from each position in one coordinate system, after which the point cloud was transformed into the coordinate system of the BIM model. The average registration error of transforming the point clouds from several stations into one coordinate system was 5 mm.

The software solution was written in Python 3.10 programming language and developed in PyCharm Community Edition 2023.1.1. The first step in the software solution is to import a BIM model via the IFC → Import IFC tab. At this stage of the workflow, visualization and interaction parameters are configurable via Project → Settings (Fig 1). The dialog exposes: theme (dark/light); background colors for the main and detail views; selection color; point-size for point-cloud rendering; wireframe line width; and a toggle for displaying coordinate axes. Changes take effect on the active viewers upon confirmation.

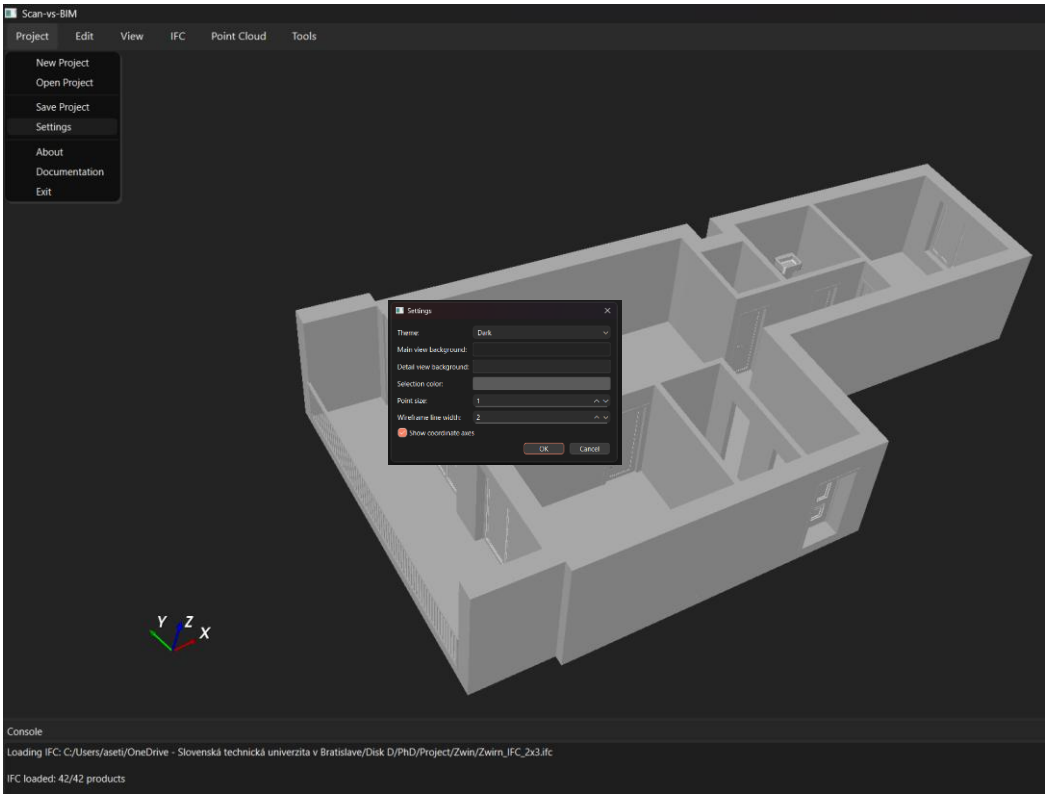


Figure 1: The settings dialog

After importing the BIM model, the next mandatory step is geometry extraction. Depending on the selected type (Wall or Column), two workflows are available. For walls, the software computes the centers and ordered corner sets of the two principal faces. For columns, the profile type is detected (rectangular or cylindrical). Rectangular columns are retained and four face centers with ordered corner points are constructed for the plane-based workflow. Cylindrical columns are currently unsupported and under active development. They are detected during profile classification and excluded from downstream processing (segmentation and deviation mapping), while remaining visible in the interface for inspection. The commands are available via IFC → Geometry extraction → Walls / Columns.

In practice, IFC models may contain non-ideal or inconsistent geometry—for example, slightly non-planar faces due to modeling tolerances, missing corners/edges, duplicate or degenerate vertices, or unit/coordinate inconsistencies. Consequently, some elements legitimately fail the conservative validation checks applied during geometry extraction and segmentation. Upon completion, the application prints a console summary with counts of processed elements (total, successful, failed,

skipped) and lists each failed element by its Global Unique Identification (GUID) together with a brief reason (e.g., non-planar profile, insufficient inliers, missing corners). In parallel, two identifier sets—successful GUIDs and failed GUIDs—are stored in the application state for the current session, and the IFC → Visualization submenu is enabled to filter display by status (Show all / Show only successful / Show only failed) (Fig. 2). These status sets drive downstream behavior: failed GUIDs are excluded from seeding, segmentation, and deviation mapping, while remaining visible for later inspection.

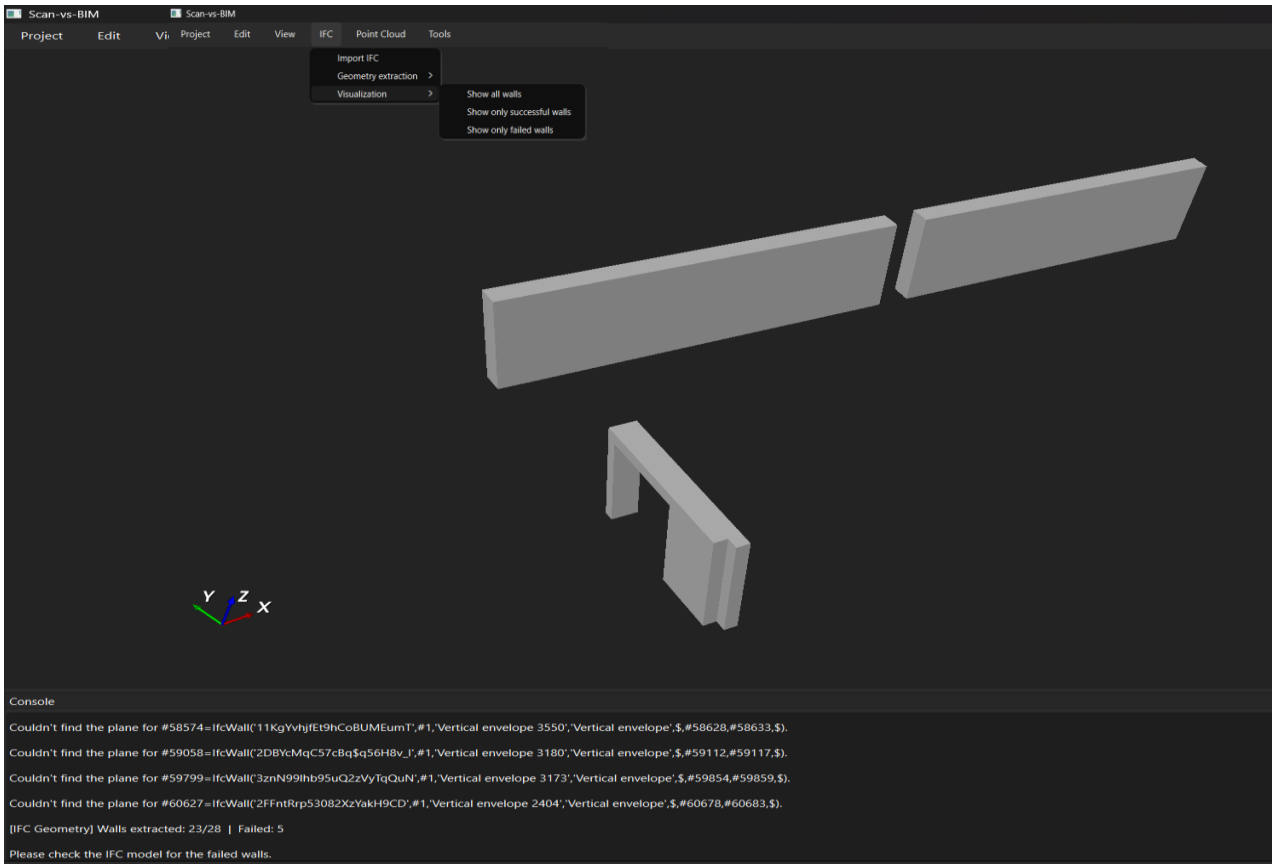


Figure 3: Geometry extraction – example scene with only failed walls and console feedback

After geometric data have been obtained, the next step is point cloud import. During this stage, the BIM layer can be hidden to work exclusively with the cloud. The import command is available via Point Cloud → Import Point Cloud (Fig. 3). The loader accepts common ASCII/binary formats (e.g., PTS/PLY/PCD/XYZ) and adds the data as a dedicated point-cloud layer.

Once loaded, pre-processing tools become available: Statistical Outlier Removal (SOR) and Voxel downsampling (Fig. 4). In SOR for each point p_i the mean distance d_i to its K nearest neighbours is computing. From the set $\{d_i\}$, a global mean μ and standard deviation σ are estimated, and points with $d_i >$ μ+ασ are labeled as outliers and removed. Voxel downsampling replaces all points within a cube of edge length v by a single representative. If v is chosen too large, fine structures can be irreversibly erased—e.g., edges around openings, narrow reveals, small offsets near wall intersections—leading to fewer inliers per face, biased plane fits, and overly smooth deviation maps. For that reason, downsampling should be applied conservatively and, where possible, restricted to render-time only (which affects visualization/export but not the data used for segmentation). Together, these operations reduce noise and control density, improving the stability and runtime of the IFC-guided segmentation that follows.

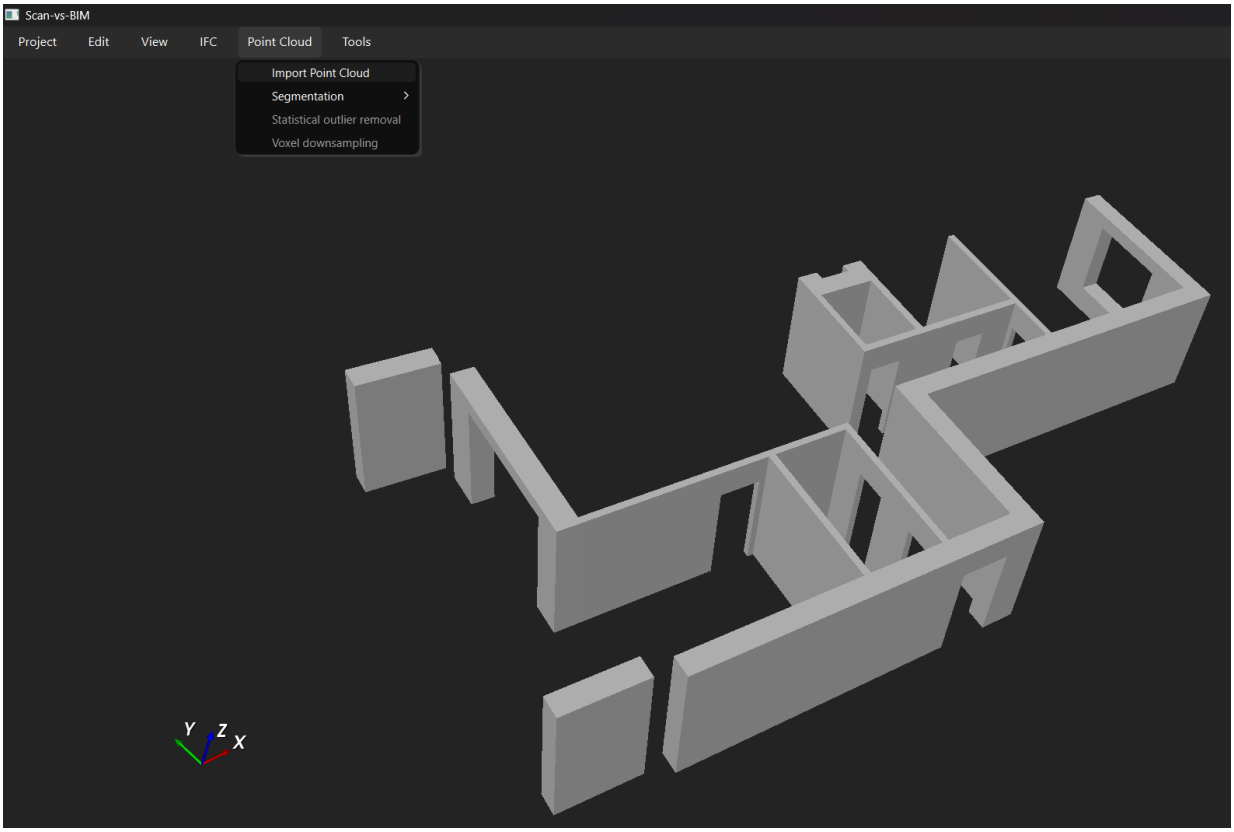


Figure 3: Point cloud tab and example scene with only successful walls

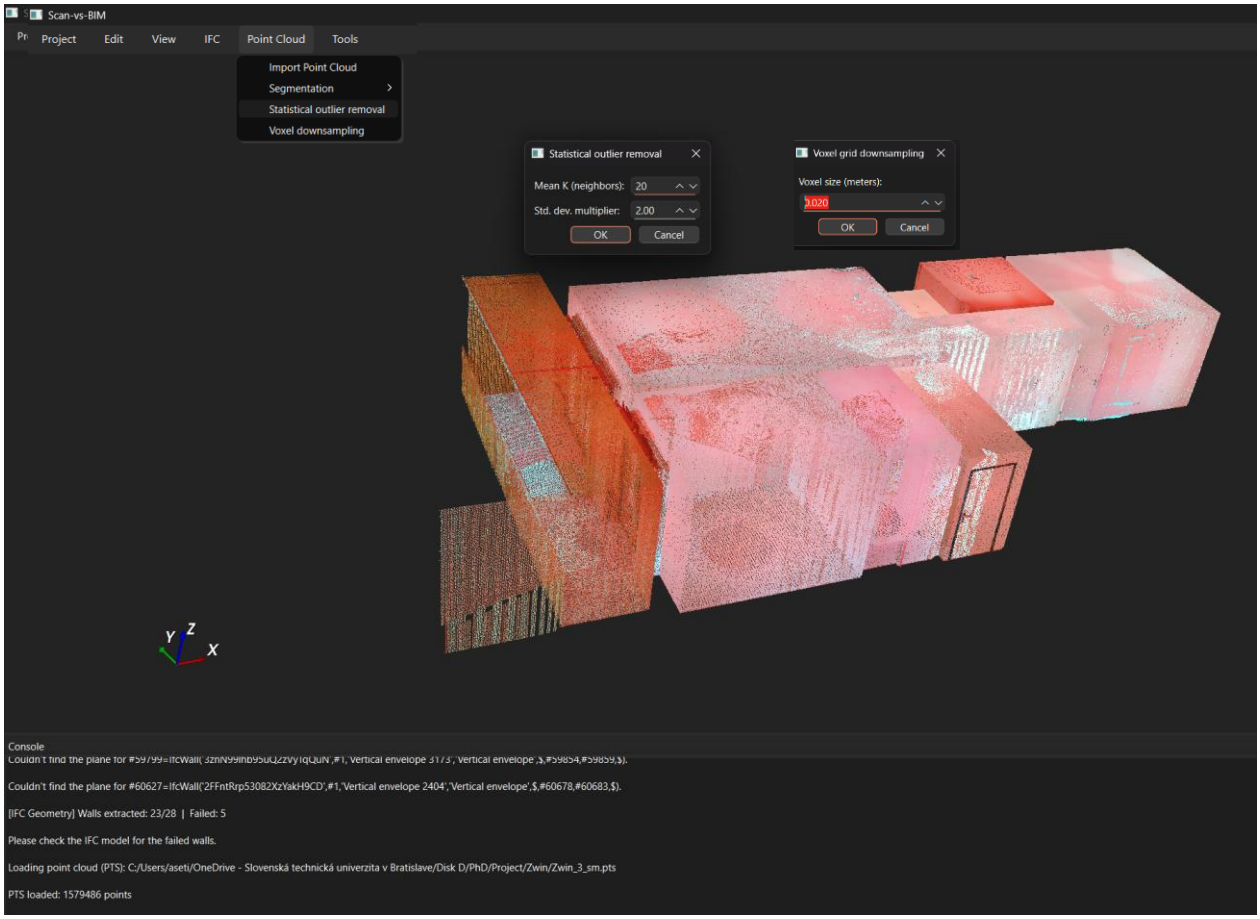


Figure 4: Imported point cloud and setting for its pre-processing

Point-cloud segmentation is a multi-stage procedure that isolates planes from the point cloud with high accuracy. Segmentation is seeded by IFC geometry and performed through iterative plane fitting (PCA/SVD) with successive filtering and inlier retention. Additional background on segmentation can be found in prior research [6–8].

At the start of a run, an output folder may be specified so that per-face results are saved automatically; segmentation can also be limited to a single selected element. The dialog then exposes the main parameters: distance threshold, normal-vector deviation, minimum inliers per plane, and maximum number of refinement iterations. An iterative algorithm is then executed.

The comparison and visualization of the data involve analyzing the extracted geometry from the BIM model alongside the segmented subsets of the as-built point cloud, leading to the creation of deviation maps. This map expresses the distance between as-planned (IFC) and as-built (point cloud) models. It shows the distance from the point cloud to the BIM model, using the general equation of that plane. The second deviation map expresses the deviation between the segmented points for the selected plane and the best-fit regression plane – to determine the relative geometric flatness.

The application displays the recovered planes, each shown in a distinct color (Fig. 5). The console provides a concise log for every face (plane index and number of inlier points) followed by a summary indicating how many faces were segmented, skipped, or failed, together with brief reasons for failure.

If automatic saving is disabled, the segmented results can be opened and inspected in the right-hand panel (Fig. 6), which displays the chosen face with either the IFC or regression map and allows on-demand export.

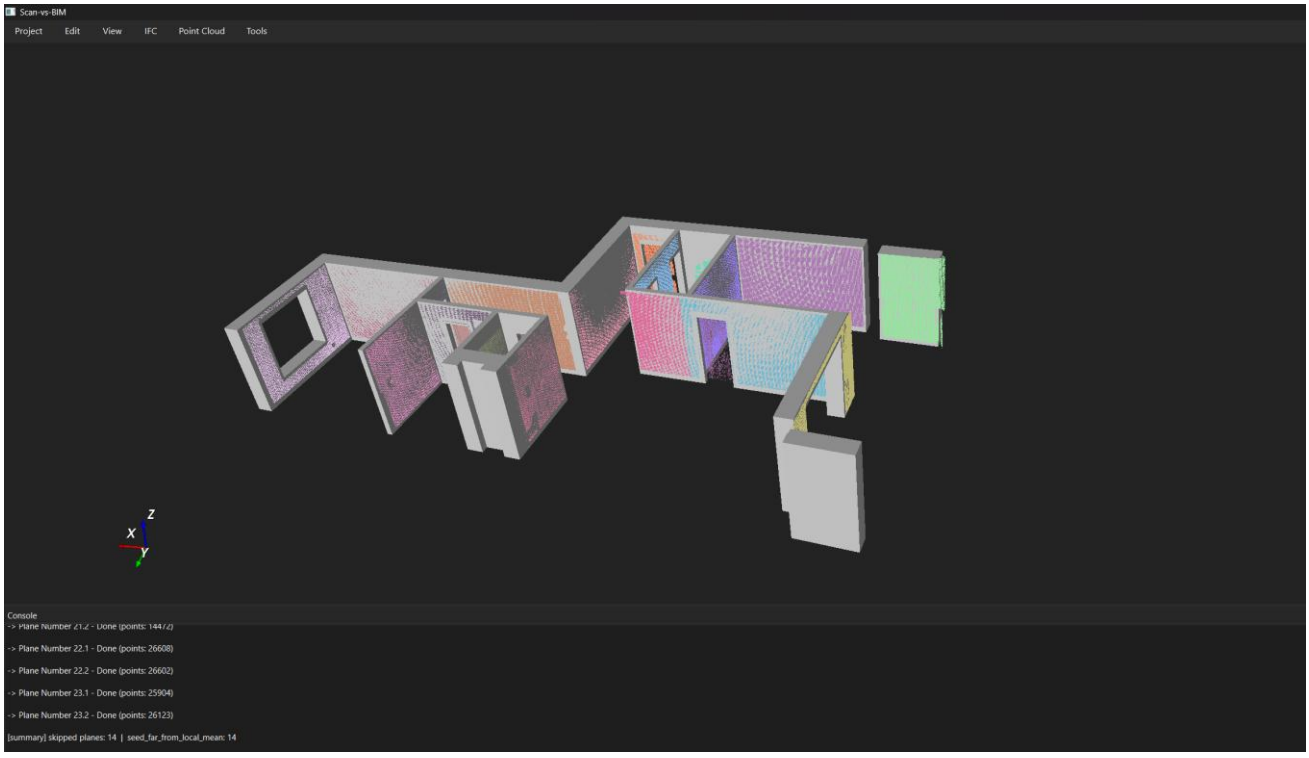


Figure 5: Segmentation results

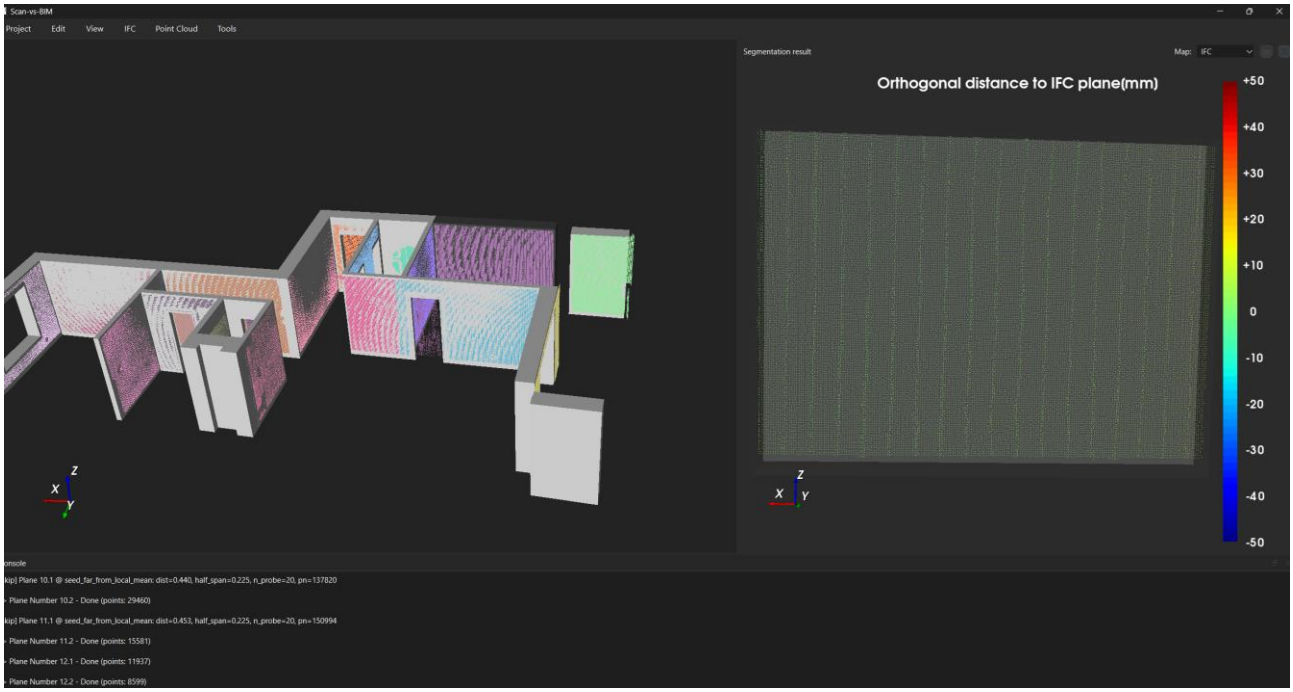


Figure 6: Segmentation results and color map opened in the software

4. Conclusion

This study develops and documents an IFC-guided, Scan-vs-BIM software solution for automated geometric verification of planar building elements. The software integrates robust IFC parsing with per-face seeding (centers and ordered corner loops), resilient point-cloud ingestion with statistical outlier removal and voxel downsampling, iterative, IFC-aware plane segmentation, and two deviation maps—distances to the IFC plane and to a best fitted regression plane—rendered as color overlays. On a representative dataset from the Zwirn apartment complex in Bratislava, the workflow demonstrates practical feasibility: wall faces are isolated and colored, per-face logs are generated, and failed elements are transparently skipped yet retained for later inspection.

Future work will focus on cylindrical columns, as well as on automation of the registration process of the point cloud into the coordinate system of the BIM model.

Acknowledgement

This work was supported by the Slovak Research and Development Agency under the Contract no. APVV-18-0247.

Funded by the NextGenerationEU through the Recovery and Resilience Plan for Slovakia under the project No. 09I03-03-V01-00053 and the project No. 09I03-03-V05-00005.

References

[1]. F. Bosché and E. Guenet, “Automating surface flatness control using terrestrial laser scanning and building information models,” *Automation in Construction*, vol. 44, pp. 212–226, 2014.

[2]. F. Bosché, M. Ahmed, Y. Turkan, C. T. Haas, and R. Haas, “The value of integrating Scan-to BIM and Scan-vs-BIM techniques for construction monitoring using laser scanning and BIM: The

case of cylindrical MEP components," *Automation in Construction*, vol. 49, Part B, pp. 201–213, 2015.

[3]. G. Z. Tsige, "Scan-vs-BIM automated registration using columns segmented by deep learning for construction progress monitoring," MSc Thesis, University of Twente, Twente, The Netherlands, 2022.

[4]. S. E. O'Keeffe, N. Hyland, C. Dore, and S. Brodie, "Automatic validation of as-is and as-generated IFCBIMs for advanced scan-to-BIM methods," in *Proceedings of the CitA BIM Gathering*, Dublin, Ireland, Nov. 23-24, 2017 pp. 110-118.

[5]. H. Polat and N. M. Ali, "A case study of quality control application with BIM-laser scanning collaboration in building construction process," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 56–66, 2019.

[6]. R. Honti, J. Erdélyi, and A. Kopáčik, "Semi-automated segmentation of geometric shapes from point clouds," Remote Sensing, vol. 14, no. 18, 2022, Art no. 4591.

[7]. A. Madiev, J. Erdelyi, and R. Honti, "Software solution for automated verification of wall structures written in Python," Pollack Periodica, vol. 19, no. 3, pp. 22–27, 2024.

[8]. J. Erdélyi, R. Honti, T. Funtík, P. Mayer, and A. Madiev, "Verification of building structures using point clouds and building information models," Buildings, vol. 12, no. 12, 2022, Art no. 2218.

Jakub Šperka[1]
Študijný program: Geodézia a kartografia, ročník: 2.

AUTOMATIZOVANÉ ZÍSKAVANIE A SPRACOVANIE DÁT MISIE SENTINEL-2 NA PRIESTOROVÉ ANALÝZY A STROJOVÉ UČENIE

OPTIONS OF ACQUISITION AND PROCESSING OF SENTINEL-2 DATA FOR SPATIAL ANALYSES AND MACHINE LEARNING

Abstract
Sentinel-2 satellites provide open multispectral data with high spatial and temporal resolution, widely used in various spatial analyses and machine learning applications. In practice, however, many available tools for data acquisition are not by default optimized for efficient dataset creation intended for automated processing. This paper provides an overview of existing approaches to Sentinel-2 data acquisition, evaluates their suitability for different analytical tasks, and highlights key challenges related to downloading, filtering, and preprocessing. It also discusses automation possibilities using open-source tools, GIS plug-ins, or custom solutions developed in the Python programming language with API-based data access. The aim of this work is to emphasize the need for universal and scalable workflows that can enhance the effective use of Sentinel-2 data in data-driven spatial analysis and modeling.

Kľúčové slová / Key Words
Sentinel-2; optické snímky; automatizácia; sťahovanie; priestorové analýzy; strojové učenie

1. Úvod

Metódy strojového učenia v súčasnosti patria k inovatívnym spôsobom spracovania a analýzy geopriestorových dát. Ich využitie však kladie vysoké nároky na dostupnosť trénovacích a validačných dát potrebných na vytvorenie spoľahlivých modelov. Družicová misia Sentinel-2 vďaka vysokému priestorovému a časovému rozlíšeniu poskytuje multispektrálne dáta vhodné pre rôznorodé aplikácie a analýzy, ktoré často využívajú aj techniky strojového učenia. Práca s týmito produktmi vo väčšom rozsahu si však vyžaduje špecifické postupy na ich efektívne získavanie, správu a predspracovanie.

Tento článok sa zameriava práve na prvý z týchto krokov – efektívne získavanie a sťahovanie dát Sentinel-2 podľa stanovených podmienok. Vzhľadom na potrebu spracovávať veľké množstvo snímok z rôznych časových období a záujmových území je manuálna tvorba dátových súborov neefektívna a časovo náročná. Článok preto hodnotí možnosti automatizovaného sťahovania a organizácie dát ako kľúčový predpoklad pre ich následné využitie v analytických a modelovacích úlohách, ktoré využívajú strojové učenie. Táto oblasť je reprezentovaná aplikáciou na detekciu rondelov. Okrem toho je schopnosť automatizovaného sťahovania satelitných dát vhodná aj pre aplikácie vyžadujúce napr. pravidelnú aktualizáciu vstupných vrstiev v čase, či iné temporálne závislé aplikácie, ako napríklad aplikácia na vyhľadávanie núdzových plôch pre parašutistickú prevádzku.

Z technického hľadiska sa článok zameriava na porovnanie rôznych prístupov k získavaniu dát Sentinel-2. Analyzuje využitie katalógových a sťahovacích rozhraní (angl. Application Programming

[1] Jakub, Šperka, Ing., Katedra globálnej geodézie a geoinformatiky,
Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava

Interface (API)) dostupných v rámci *Copernicus Data Space Ecosystem* (CDSE) implementovaných v jazyku Python, komerčné cloudové riešenia tretích strán s proprietárnymi API (napr. *Google Earth Engine*) a tiež možnosti plug-in rozšírení v GIS prostredí umožňujúcich užívateľsky jednoduché rozhranie s možnosťami následného skriptovania. Toto porovnanie predstavuje základ pre efektívny vývoj riešení použiteľných v rôznych aplikáciách. Dôraz sa kladie najmä na ich prispôsobiteľnosť a škálovateľnosť, aby bolo možné prístupy jednoducho upravovať a rozširovať podľa potrieb konkrétnych úloh.

Nasledujúce kapitoly prinášajú porovnanie rôznych prístupov k získavaniu dát Sentinel-2 z pohľadu ich technickej náročnosti, výpočtovej a dátovej efektivity, flexibility a potenciálu integrácie do existujúcich aj nových aplikácií a pracovných postupov.

2. Praktické prístupy k automatizovanému sťahovaniu dát Sentinel-2

Nasledujúca kapitola sa venuje trom konkrétnym prístupom k implementácii automatizovaného sťahovania a predspracovania dát Sentinel-2 pre vyššie opísané aplikačné oblasti. V prvom rade analyzuje úskalia využitia katalógového a sťahovacieho API *Copernicus Data Space Ecosystem* (CDSE) [1]. Následne rozoberá možnosti použitia riešení tretích strán, ako napríklad Google Earth Engine, a v neposlednom rade aj užívateľsky prístupné riešenie v podobe jednoduchého plug-in rozšírenia pre softvér QGIS [2].

2.1 Copernicus Data Space Ecosystem – katalógové a sťahovacie API

Pre získavanie jednotlivých snímok z družicovej misie Sentinel-2 je možné využiť dostupný *Copernicus Browser* [3]. Toto riešenie je plne postačujúce pre základnú prácu s produktmi diaľkového prieskumu Zeme a pre analýzy, ktoré nevyžadujú časovú dynamiku. Avšak pri potrebe hromadného sťahovania snímok a ich následného spracovania je nevyhnutné implementovať prístup, ktorý umožňuje automatizované získavanie dát. Na tento účel je v rámci CDSE dostupné aj rozhranie API služieb. Po jeho implementácii je možné pristupovať k dátam Sentinel-2 plne automatizovaným spôsobom. Tento prístup však vyžaduje podrobnejšie pochopenie a implementáciu rozhrania API OpenSearch [4] a OData [5], čo môže byť pre menej skúsených používateľov náročnejšie.

Získavanie dát možno rozdeliť do dvoch základných krokov. Prvým krokom je API dopyt so zadanými parametrami na vyhľadávanie snímok, napríklad dátum snímania, úroveň spracovania alebo percentuálne pokrytie oblačnosťou. Výsledkom dopytu je množina záznamov, ktoré zodpovedajú stanoveným podmienkam vyhľadávania, vrátane identifikátorov jednotlivých snímok.

V ďalšom kroku je potrebné autentifikovať prístup používateľa do databázy, a to prostredníctvom jedného z podporovaných spôsobov prihlásenia – najčastejšie pomocou používateľského mena a hesla registrovaného v systéme CDSE. Až po úspešnej autentifikácii je možné na základe identifikátorov konkrétnych snímok z katalógu pristúpiť k ich stiahnutiu. Výsledkom procesu sťahovania je archív obsahujúci všetky spektrálne pásma danej snímky spolu s pridruženými metadátami.

Implementácia tohto postupu je pomerne náročná a nie úplne používateľsky prístupná, a to aj z dôvodu menej prehľadnej dokumentácie. Pri realizácii API dopytov v jazyku Python je potrebné využívať viaceré knižnice. Získané snímky prichádzajú vo svojej surovej podobe, typickej pre danú úroveň spracovania. Ďalšie kroky predspracovania – ako napríklad tvorba výrezov, výpočet indexov či úprava kontrastu – musia byť implementované samostatne, keďže API neumožňuje priamy prístup k už predspracovaným výstupom.

V praxi je preto potrebné vyvinúť vlastnú obalovú knižnicu (angl. wrapper) nad API v jazyku Python, keďže plne funkčné riešenia, ktoré by pokrývali celý proces od vyhľadávania až po sťahovanie snímok, nie sú vo verejných repozitároch dostupné. Niektoré existujúce riešenia sú

ponúkané len ako proprietárne služby s komerčnou licenciou [6]. Voľne dostupné riešenia na získavanie a predspracovanie Sentinel dát sú dostupné napríklad pre jazyk R [7].

2.2 Google Earth Engine

Alternatívou k implementácii oficiálneho API rozhrania CDSE je využitie služieb tretích strán. V kontexte spracovania dát diaľkového prieskumu Zeme sa ako vhodné riešenie javí platforma Google Earth Engine (GEE) [8]. Na rozdiel od CDSE poskytuje GEE aj možnosti predspracovania dát, ako napríklad výpočet indexov, filtráciu oblačnosti či tvorbu časových mozaík snímok. Pri praktickom využití je však potrebné riešenie aj programátorsky implementovať, v našom prípade najčastejšie v jazyku Python, a to buď prostredníctvom rozhrania GEE API, alebo s využitím na to určenej knižnice, ktorá je pre GEE pre Python dostupná.

Služba však podlieha určitým obmedzeniam, predovšetkým objemovým limitom spracovaných dát. Prístup na nekomerčné účely je možné získať bezplatne prostredníctvom registrácie, avšak pri komerčnom využití je GEE spoplatnené. Integrita dát je tiež do určitej miery kompromisná, keďže snímky sú spravované a poskytované na serveroch spoločnosti Google a neprichádzajú s úplnými pôvodnými metadátami z databázy CDSE.

2.3 QGIS nástroj „Sentinel-2 Image Downloader“

Z hľadiska používateľského prístupu môže byť implementácia programátorských riešení prostredníctvom dostupných API rozhraní pre bežných používateľov problematická. Možnosť získavať väčšie množstvo snímok Sentinel-2 definovaných parametrami v intuitívnom grafickom prostredí je preto mimoriadne prínosná. Rozšírenie *Sentinel-2 Image Downloader* [2] pre GIS softvér QGIS umožňuje jednoduché vyhľadávanie, filtrovanie a sťahovanie snímok na základe zadaných kritérií, ako sú napríklad záujmové územie, úroveň spracovania produktu (L2A, L1C), časové obdobie či stupeň oblačnosti.

Rozšírenie si vo svojom grafickom rozhraní zachováva dvojkrokový prístup k získavaniu snímok Sentinel-2. Prvým krokom je proces komplementárny ku katalógovej službe, ktorý slúži na vyhľadanie dostupných snímok pre zadané záujmové územie. Výsledkom je súbor typu *GeoPackage* obsahujúci polygóny reprezentujúce pôdorysy snímok na povrchu Zeme spolu s viacerými atribútmi, ako sú parametre filtrovania či identifikátor snímky v databáze CDSE, potrebný pre následný krok, ktorým je stiahnutie dát. Samotný proces sťahovania je rozšírený o možnosť výberu konkrétnych spektrálnych pásiem a výpočtu základných vegetačných indexov. Táto funkcionalita je veľmi užitočná najmä pri rýchlych priestorových analýzach a zároveň prispieva k úspore úložného priestoru. Vďaka možnosti dávkového sťahovania snímok je možné jednoducho vytvoriť dátovú sadu vhodnú na následné analytické spracovanie. Takto získané snímky možno ďalej spracovávať programátorským prístupom prostredníctvom knižníc na spracovanie obrazu, alebo pokračovať v prostredí GIS a realizovať aj ďalšie kroky predspracovania dát pre strojové učenie či iné typy analýz pomocou vstavaných funkcií systému QGIS. Toto riešenie predstavuje jednoduchý používateľský prístup, ktorý nevyžaduje pokročilé programátorské znalosti ani skúsenosti s webovými technológiami. Pre zachovanie dôveryhodnosti a konzistencie dát je dôležité, že rozšírenie získava snímky Sentinel-2 priamo z databázy CDSE a nespolieha sa na dátové zdroje tretích strán.

3. Cieľové aplikácie a kontext použitia

Vývoj univerzálne použiteľnej a optimalizovanej platformy bez jasne definovaného aplikačného kontextu predstavuje náročnú úlohu. Jednotlivé aplikácie síce vykazujú určité podobnosti v požiadavkách na funkcionalitu systému, zároveň však prinášajú aj výrazné rozdiely v prístupe k práci

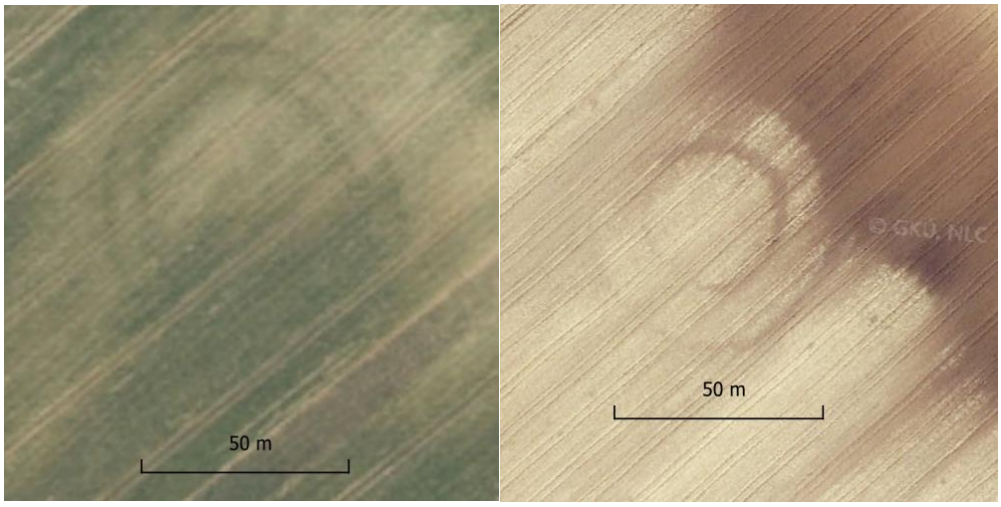
s dátami. Tieto odlišnosti možno demonštrovať na viacerých príkladoch konkrétnych spôsobov použitia, typických pre úlohy strojového učenia a geopriestorovej analýzy. V nasledujúcich aplikáciách sme preto využívali a overovali rôzne prístupy k sťahovaniu a predspracovaniu dát, ktoré boli popísané v predchádzajúcej kapitole.

3.1 Detekcia rondelov

Prvou zo skúmaných oblastí je využitie snímok Sentinel-2 na experimentálnu detekciu pravekých kruhových štruktúr, rondelov, na vybraných lokalitách juhozápadného Slovenska [9], [10]. Cieľom v prvej fáze nie je plošné vyhľadávanie všetkých rondelov na území Slovenska, ale overenie možností dát Sentinel-2 pri identifikácii už známych lokalít a analýza podmienok, za ktorých sú tieto štruktúry v snímkach diaľkového prieskumu Zeme najlepšie viditeľné. Výskum sa zameriava aj na identifikáciu spoločných charakteristík prejavu rondelov v rôznych spektrálnych pásmach a časových obdobiach, ako aj na určenie faktorov, ktoré ovplyvňujú ich viditeľnosť, napr. vegetačný kryt, vlhkosť pôdy a sezónne zmeny.

Tieto monumentálne stavby pochádzajú z mladšej doby kamennej a patria medzi významné archeologické náleziská po celej strednej Európe, vrátane Slovenska. Najstaršie z nich možno datovať až do 5000 rokov p.n.l., čo z nich robí jedny z najstarších monumentálnych stavieb na území Slovenska. Ich presný účel dodnes nemožno s istotou určiť. Archeologické nálezy naznačujú, že mohli byť centrom náboženských alebo kultových rituálov, nie je však vylúčené že mohli byť aj miestom spoločenských či politických zhromaždení [11]. Veľký prielom v hľadaní týchto štruktúr priniesla oblasť tzv. leteckej archeológie. Vyhľadávanie týchto monumentálnych pravekých stavieb prebieha s využitím rôznych typov optických dát, vrátane snímok Sentinel-2. Vzhľadom na charakter ich prejavu v teréne, prostredníctvom sekundárnych vegetačných a pôdnych znakov, zobrazených na obrázku 1, je ich viditeľnosť v dátach diaľkového prieskumu Zeme vo veľkej miere ovplyvnená vlhkosťou pôdy, vegetačným krytom a sedimentačnými procesmi.

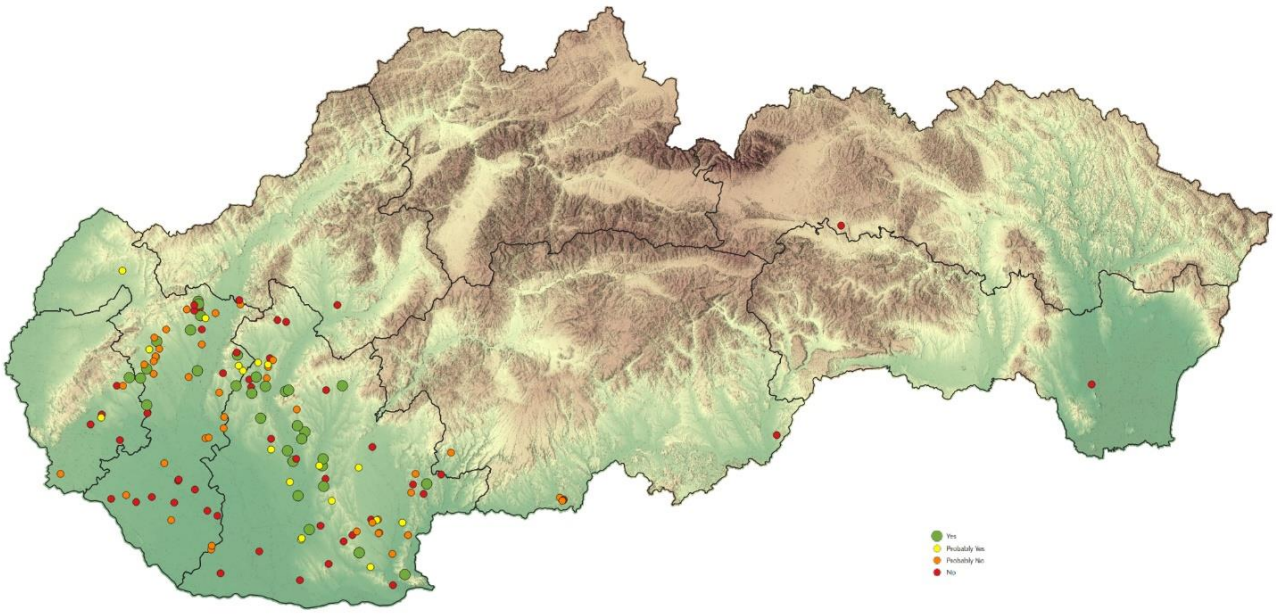
Menované faktory sú závislé od ročných období či úhrnu zrážok v danom roku [12]. Vysoké časové rozlíšenie snímok Sentinel-2 (s opakovaným preletom približne každých 5 dní) a dostupnosť viacerých spektrálnych pásiem umožňujú výpočet širokej škály vegetačných, pôdnych aj vodných indexov. Táto vlastnosť je pri detekcii rondelov mimoriadne prínosná, keďže ich prítomnosť v teréne sa často prejavuje len subtílnymi zmenami hodnôt týchto indexov. Z uvedeného vyplývajú zvýšené nároky na získavanie a predspracovanie dát, najmä v kontexte ich následného využitia pri aplikácii detekčných a segmentačných modelov strojového učenia.



Obrázok 1: Vegetačné a pôdne príznaky rondelov zachytené na ortofotomozaike, Borovce – Zadné Pole 1 (vľavo), Kľačany – Štvrte (vpravo)
Zdroj: GKÚ, NLC

Prvým prístupom predspracovania dát pre túto aplikáciu je stiahnutie všetkých snímok obsahujúcich referenčné (angl. Ground Truth) vzorky rondelov v určitom časovom období. Tieto snímky je následne možné spracovať ako jednotný celok, na ktorom možno vypočítať vegetačné indexy, zvýšiť kontrast pre celé územie a vytvoriť binárnu masku určenú pre ďalšie detekčné alebo segmentačné úlohy. Rozdielne hodnoty vegetačných indexov, ich vizualizácia a úprava kontrastu vykonávaná globálne pre celú záujmovú oblasť však z hľadiska využitia strojového učenia nemusia byť optimálne. Globálne spracovanie snímky môže spôsobiť, že viaceré referenčné vzorky rondelov nie sú pri tvorbe binárnej masky identifikovateľné – najmä v dôsledku rozsahu hodnôt, nastaveného prahu alebo prítomnosti oblačnosti [13], [14]. Z tohto dôvodu je vhodné vykonávať výber snímok v širšom časovom období, aby model strojového učenia získal dostatočne variabilné a reprezentatívne trénovacie dáta [15]. Tento prístup zároveň umožňuje viacvrstvový tréning s využitím ďalších zdrojov dát, ako sú digitálne modely terénu (DMT), mapy typov pôdy či informácie o spôsobe obrábania pôdy, ktoré môžu zlepšiť presnosť a robustnosť výsledných modelov.

Druhý prístup predspracovania dát je zameraný na tvorbu trénovacieho datasetu pozostávajúceho z referenčných vzoriek pre diskrétne lokality s potvrdeným výskytom rondelov. Pre každý konkrétny rondel je definovaná malá záujmová oblasť, z ktorej je vytvorený výrez. K výpočtu vegetačných indexov možno pre optimalizáciu času pristupovať globálne, avšak vizualizáciu a úpravu kontrastu je vhodné vykonávať individuálne – podľa rozsahu hodnôt pre dané územie. Jednotlivé výrezy je možné zväčšovať a otáčať s cieľom zvýšiť počet trénovacích vzoriek [16]. Tento prístup umožňuje pracovať s dátami v dlhšom časovom horizonte, čím taktiež napomáha vytvárať rozsiahlejší trénovací dataset reflektujúci sezónne zmeny a rozdielne podmienky snímania. Pre tieto oblasti možno následne vytvoriť binárne masky použiteľné pre segmentačné modely, prípadne označiť len oblasti s pozitívnym nálezom pre modely určené primárne na hrubú detekciu týchto štruktúr. Vstupom zostavenie trénovanej a validačnej množiny sú rondely z databázy rondelov, ktorej vizualizácia je na obrázku 2. Potvrdené rondely boli validované viacerými metódami, napríklad leteckou archeológiou, geofyzikálne, či výkopovými prácami.

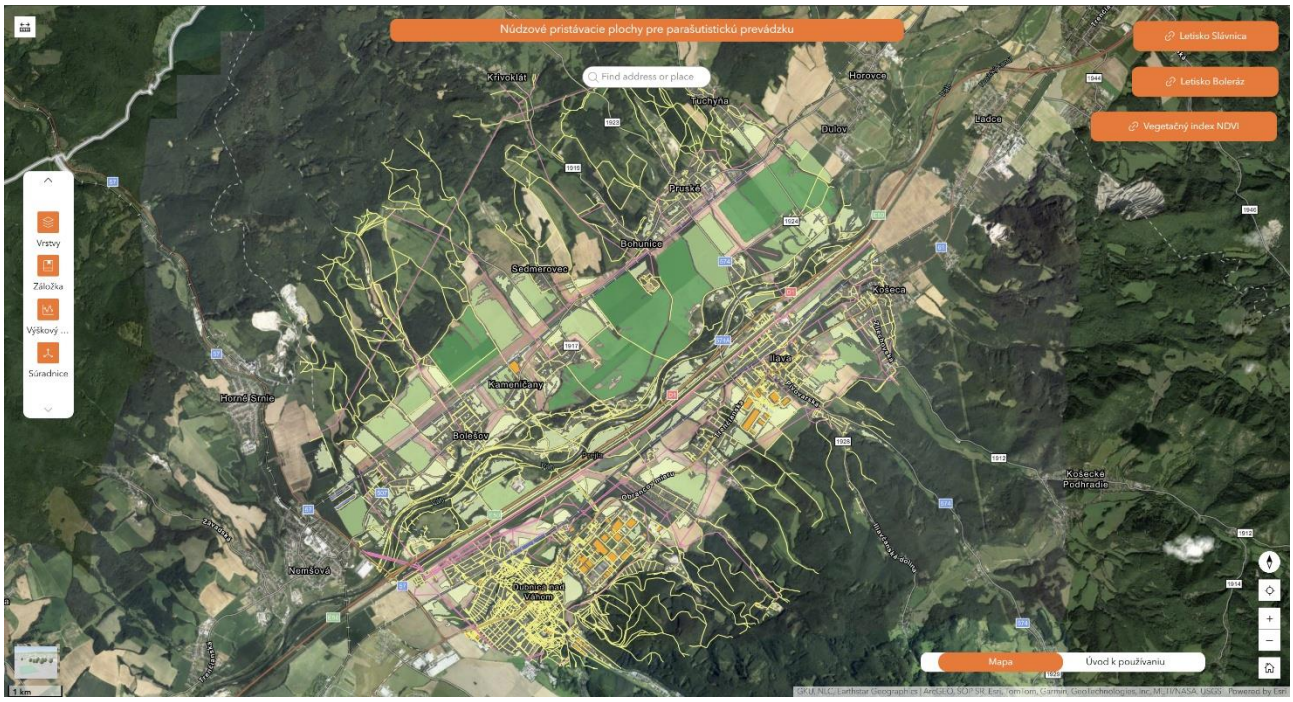


Obrázok 2: Databáza rondelov SR
(Zelená - Áno, Žltá - Pravdepodobne áno, Oranžová - Pravdepodobne nie, Červená - Nie)
Zdroj: Ing. Tibor Lieskovský, PhD. (databáza rondelov), ÚGKK SR (administratívne členenie, DMR 5.0)

3.2 Analýza lokalít vhodných na parašutistickú prevádzku

Druhou aplikačnou oblasťou, pri ktorej sa naskytuje možnosť automatizovaného sťahovania dát Sentinel-2, je identifikácia lokalít vhodných na parašutistickú prevádzku. Konkrétne ide o vyhľadávanie vhodných plôch na núdzové pristátie v prípade náhlej zmeny počasia, nepriaznivých poveternostných podmienok alebo nesprávneho výsadku v priestore, kde sa používateľ nemôže bezpečne dostať do vyhradeného priestoru pristátia v oblasti letiska. V súčasnosti bola experimentálne vyvinutá aplikácia [17] s príslušnými analytickými nástrojmi, ktorej používateľské rozhranie je zobrazené na obrázku 3, avšak niektoré časovo premenlivé faktory, ktoré do nej vstupujú, je potrebné pravidelne manuálne aktualizovať [18]. Kľúčovú úlohu pritom zohrávajú vegetačné indexy, najmä SAVI (angl. Soil Adjusted Vegetation Index) a NDVI (angl. Normalized Difference Vegetation Index), ktoré sa menia v závislosti od ročného obdobia, úrovne obrábania krajiny, vlhkosti pôdy, či typu vegetácie.

Automatizované sťahovanie a spracovanie týchto dát zo systému Sentinel-2 preto umožňuje zachovávať ich aktuálnosť a zvyšuje presnosť modelu pri určovaní vhodných lokalít na núdzové pristátie. Takto aktualizované dáta následne umožňujú používateľovi ešte pred zoskokom oboznámiť sa s aktuálnym stavom terénu a identifikovať najvhodnejšie miesta pre prípad núdzového pristátia.



Obrázok 3: Ukážka online aplikácie "Núdzové pristávacie plochy pre parašutistickú prevádzku"
Zdroj: [17]

4. Záver

V práci boli predstavené a aplikované tri prístupy k získavaniu a spracovaniu dát zo satelitnej misie Sentinel-2, ktoré sa líšia úrovňou automatizácie aj používateľskej náročnosti. CDSE API predstavuje najflexibilnejšie riešenie umožňujúce plnú automatizáciu procesu, no jeho implementácia je technicky náročná a vyžaduje znalosti programovania. Google Earth Engine ponúka jednoduchšiu prácu s dátami a nástroje na ich predspracovanie, avšak s určitými objemovými limitmi a obmedzenou kontrolou nad metadátami. Rozšírenie „Sentinel-2 Image Downloader" pre QGIS je naopak

najjednoduchším riešením z hľadiska používateľa a umožňuje rýchlo vytvárať dátové sady bez potreby programovania.

Z porovnania vyplýva, že vhodný spôsob získavania dát závisí od konkrétneho cieľa a technických možností používateľa. Pre rozsiahle projekty je výhodná automatizácia pomocou API, zatiaľ čo pre menšie analýzy postačujú nástroje integrované priamo v QGIS. Všetky prístupy však ukazujú, že automatizované spracovanie otvorených satelitných dát predstavuje dôležitý krok k efektívnejšiemu využívaniu informácií z diaľkového prieskumu Zeme v rôznych aplikáciách, ako sú napríklad úlohy strojového učenia alebo priestorové analýzy meniacich sa javov v čase. Jednotlivé prístupy boli zároveň prakticky využité aj v prípadových štúdiách zameraných na detekciu rondelov a analýzu lokalít vhodných pre parašutistickú prevádzku, čím bola overená ich použiteľnosť v odlišných aplikačných kontextoch.

Literatúra

[1] C. D. S. Ecosystem, “Copernicus Data Space Ecosystem | Europe’s eyes on Earth”. Cit: 26. október 2025. [Online]. Available at: https://dataspace.copernicus.eu/
[2] M. ÇALIŞKAN, *Sentinel-2 Image Dowloader QGIS plug-in*. (26. máj 2025). Python. Cit: 26. október 2025. [Online]. Available at: https://github.com/caliskanmurat/qgis_sentinel2_image_downloader_plugin
[3] “Copernicus Browser”, Copernicus Browser. Cit: 26. október 2025. [Online]. Available at: https://browser.dataspace.copernicus.eu/
[4] “OpenSearch Catalog web service – Documentation”. Cit: 09. november 2025. [Online]. Available at: https://documentation.dataspace.copernicus.eu/APIs/OpenSearch.html
[5] “OData – Documentation”. Cit: 09. november 2025. [Online]. Available at: https://documentation.dataspace.copernicus.eu/APIs/OData.html
[6] “Sentinel Hub”. Cit: 26. október 2025. [Online]. Available at: https://www.sentinel-hub.com/
[7] L. Ranghetti, M. Boschetti, F. Nutini, a L. Busetto, “‘sen2r’: An R toolbox for automatically downloading and preprocessing Sentinel-2 satellite data”, *Computers & Geosciences*, roč. 139, s. 104473, jún. 2020, doi: 10.1016/j.cageo.2020.104473.
[8] “Google Earth Engine”. Cit: 26. október 2025. [Online]. Available at: https://earthengine.google.com
[9] P. Demján, “Reconstruction of Rondel 2 (Large Rondel) from the site Svodín, Busahegy (SW Slovakia)”, Cit: 25. október 2025. [Online]. Available at: https://www.academia.edu/1744974/Reconstruction_of_Rondel_2_Large_Rondel_from_the_site_Svod%C3%ADn_Busahegy_SW_Slovakia_
[10] “Kruhové priekopové útvary na Slovensku - aktuálny stav | Request PDF”, ResearchGate. Cit: 25. október 2025. [Online]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/210365729_Kruhove_priekopove_utvary_na_Slovensku_-_aktualny_stav
[11] J. Pavuk a V. Karlovsky, “Orientácia rondelov lengyelskej kultúry na smery vysokého a nízkeho mesiaca”, *SlA*, roč. 052, s. 211//272//273//280, jan. 2004.
[12] Z. Czajlik, M. Árvai, J. Mészáros, B. Nagy, L. Rupnik, a L. Pásztor, “Cropmarks in Aerial Archaeology: New Lessons from an Old Story”, *Remote Sensing*, roč. 13, č. 6, s. 1126, jan. 2021, doi: 10.3390/rs13061126.
[13] A. Agapiou, D. D. Alexakis, A. Sarris, a D. G. Hadjimitsis, “Evaluating the Potentials of Sentinel-2 for Archaeological Perspective”, *Remote Sensing*, roč. 6, č. 3, s. 2176–2194, mar. 2014, doi: 10.3390/rs6032176.
[14] K. Kozioł, N. Borowiec, U. Marmol, M. Rzeszutek, C. A. G. Santos, a J. Czerniec, “Machine Learning-Based Detection of Archeological Sites Using Satellite and Meteorological Data: A

Case Study of Funnel Beaker Culture Tombs in Poland", *Remote Sensing*, roč. 17, č. 13, s. 2225, jan. 2025, doi: 10.3390/rs17132225.

[15] N. Abate, A. Elfadaly, N. Masini, a R. Lasaponara, "Multitemporal 2016-2018 Sentinel-2 Data Enhancement for Landscape Archaeology: The Case Study of the Foggia Province, Southern Italy", *Remote Sensing*, roč. 12, č. 8, s. 1309, jan. 2020, doi: 10.3390/rs12081309.

[16] X. Hao, L. Liu, R. Yang, L. Yin, L. Zhang, a X. Li, "A Review of Data Augmentation Methods of Remote Sensing Image Target Recognition", *Remote Sensing*, roč. 15, č. 3, s. 827, jan. 2023, doi: 10.3390/rs15030827.

[17] D. Pavelka a J. Faixová Chalachanová, "Núdzové plochy", Núdzové pristávacie plochy pre parašutistickú prevádzku. Cit: 26. október 2025. [Online]. Available at: https://experience.arcgis.com/experience/1f4f92ad371e444cbda69941fe550de4/page/Mapa

[18] J. Faixová Chalachanová, P. Letko, J. Šperka, a D. Pavelka, "Publication of automatically detected emergency landing areas for parachuting operations", prezentované na Tatry -2025 Globálna geodézia a geoinformatika, Štrbské Pleso, 17. október 2025. [Online]. Available at: https://www.ssgk.sk/akcie/2025/zbornikabstr_tatry25_web.pdf

Poznámka: Na jazykovú a štylistickú úpravu textu bol použitý nástroj ChatGPT 5 (OpenAI, 2025). Nástroj bol využitý výhradne na formálnu a gramatickú revíziu textu bez zásahu do odborného obsahu práce.

Hana Vesteg[1]
Študijný program: Geodézia a kartografia, 2. ročník

ZISTENIE NESÚLADOV DRUHOV POZEMKOV PRI REVÍZII KATASTRA NEHNUTEĽNOSTÍ

IDENTIFICATION OF LAND USE DISCREPANCIES IN THE CADASTRAL DATA REVISION

Abstract

The paper focuses on the revision of cadastral data and describes it as an important and cost-effective tool for improving the reliability of cadastral data. The main objective was to identify discrepancies between the types of land registered in the cadastre and the actual situation in the field. The research was carried out in the cadastral unit of Pác, where UAV photogrammetry was used to create an orthomosaic. This served as a basis for comparing the actual state with the existing valid vector cadastral map for the unit. Despite the fact that the cadastral records in the area were renewed in the past by new mapping, the results show that the incidence of discrepancies is still high and the maps need to be continuously revised. The revision has also proven to have a significant economic impact on the calculation of property tax and, at the same time, allows for the improvement of data used in statistics tracking the loss of agricultural land.

Kľúčové slová / Key Words
Kataster nehnuteľností, revízia údajov KN, UAV fotogrametria

1. Úvod

Revízia údajov katastra predstavuje efektívny a finančne menej náročný spôsob aktualizácie údajov v porovnaní s obnovou katastrálneho operátu novým mapovaním (OKO NM). Hoci je táto metóda aktualizácie katastrálnych dát zakotvená v zákone č. 162/1995 Z.z. o katastri nehnuteľností [1], [2], podľa výročnej správy Úradu geodézie, kartografie a katastra Slovenskej republiky (ÚGKK SR) [3] sa v súčasnosti na území Slovenska revízia údajov nevykonáva. Hlavným dôvodom jej obmedzeného využívania je nedostatok finančných prostriedkov a personálnych kapacít štátnej správy a taktiež na jej realizáciu nie sú v súčasnosti žiadne aktuálne vykonávacie nariadenia ani metodika. V rámci moderných prístupov mapovania je v súčasnosti možné pri revízii využívať aj moderné technológie, ktoré umožňujú realizovať revíziu efektívnejšie ako v minulosti. Jednou z najperspektívnejších metód je využitie bezpilotných leteckých systémov (UAS), ktoré poskytujú snímky vo vysokom rozlíšení a umožňujú tvorbu ortofotomozaík. Na ich podklade sa dá porovnať terén s aktuálnymi mapami KN a môžu taktiež poslúžiť na vizuálnu identifikáciu zmien alebo nesúladov.

Cieľom príspevku je poukázať na potrebu a význam aplikácie revízie v SR, s dôrazom na zisťovanie nesúladov druhov pozemkov. Metodika je demonštrovaná na konkrétnych príkladoch v katastrálnom území (k.ú.) Pác. Osobitná pozornosť je venovaná analýze ekonomických dôsledkov

[1] Hana, Vesteg, Ing., Katedra geodézie, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

zistených nesúladov pri určovaní dane z nehnuteľností a na úbytok poľnohospodárskej pôdy. Vďaka nej bude možné prispieť aj k lepšiemu monitorovaniu dopadov urbanizácie na životné prostredie.

2. Tvorba podkladov využiteľných pri revízii KN pomocou UAV fotogrametrie

Na účely vedeckého spracovania bolo vybrané katastrálne územie, v ktorom v roku 2012 až 2013 prebehlo OKO NM. Výsledkom obnovy bola číselná vektorová katastrálna mapa a aktualizovaný súbor popisných informácií (SPI).Vzhľadom na to, že revízia údajov katastra by sa mala realizovať v pravidelných cykloch, najmä v územiach, kde bola vykonaná obnova, bolo vybrané katastrálne územie Pác ako vhodný kandidát na overenie metodiky revízie.

1. Príprava podkladov a zber dát

Na prípravu podkladov bolo potrebné vykonať mapovanie pomocou UAV (Unmanned Aerial Vehicle) fotogrametrie. Pred začiatkom revízie boli mapovacie práce oznámené starostovi obce e-mailom a občania boli informovaní prostredníctvom obecného rozhlasu o plánovanom termíne merania. Terénne práce začali rekognoskáciou územia s cieľom overiť, či sú zachované stabilizačné body z OKO NM a určiť vhodné rozmiestnenie vlícovacích bodov (VB). Tieto body boli zamerané pomocou GNSS prijímača Leica GS15 a stabilizované buď fotogrametrickými terčíkmi, alebo s využitím prirodzene signalizovaných objektov.

Obr. 1 Meracie práce v teréne a signalizácia VB

2. Letecké snímkovanie

Snímkovanie bolo realizované UAV zariadením DJI Mavic 3 Enterprise (M3E) vo výške letu približne 56,9 m. Celkový počet získaných snímok bol 8 602, s pozdĺžnym prekrytom 80% a priečnym prekrytom 70% s priemerným rozlíšením 5cm/pix. Použitá kamera M3E (12,29 mm) mala rozlíšenie 5280x3956 px a veľkosť pixelu 3,36 μm. Snímkovanie prebehlo počas približne 4 hodín. Priemerná presnosť určenia polohy kamery bola 537 cm, s chybou v osi X 2,9 cm, Y 3,7 cm a Z 3,2 cm.

3. Kontrolné a vlícovacie body

Na území bolo zriadených 30 VB, z ktorých 24 bolo použitých ako VB a 6 ako kontrolné body. Výsledné stredné chyby určenia polohy VB a kontrolných bodov dosiahli hodnoty:

- X = 0,96 cm, Y = 1,85 cm, Z = 3,49 cm, celková chyba = 4,07 cm (VB)
- X = 1,70 cm, Y = 2,06 cm, Z= 4,35 cm, celková chyba = 5,10 cm (kontrolné body)

Tieto výsledky potvrdzujú vysokú presnosť spracovania modelu a dostatočnú kvalitu pre potreby revízie katastrálnych údajov.

4. Spracovanie dát

Spracovanie snímok prebiehalo v softvéri Agisoft Metashape Profesional (verzia 2.1.0, build 17453) v súradnicovom systéme S-JTSK / Křovák East North (EPSG:5514). Spracovanie pozostávalo z nasledovných krokov:

- tvorba riedkeho mračna bodov,
- generovanie hustého mračna bodov,
- vytvorenie digitálneho modelu povrchu (DMP) s rozlíšením 5cm/pix,
- tvorba ortofotomozaiky s rozlíšením 2cm/pix a rozmermi 59 391 x 64 905 px.

Celkový čas spracovania projektu presiahol 45 hodín vrátane tvorby mračien bodov, DMP a finálnej pravej orotfotomozaiky. Výsledné dáta dosiahli veľkosť 297 GB.

3. Zistenie nesúladov druhov pozemkov v k.ú. Pác na podklade ortofotomozaiky

Jedným z údajov o pozemkoch je okrem čísla parcely, výmery a spôsobu využitia aj druh pozemku. Je dôležité udržiavať aktuálny druh pozemku a to z niekoľkých dôvodov. Prvý dôvod je samozrejme finančný. Každoročne je vlastník povinný podať priznanie k dani z nehnuteľností [4]. Tá sa ďalej delí na priznanie k dani z pozemku, dani zo stavieb a dani z bytov. Pri vypĺňaní tlačiva, sa okrem iných informácií o pozemku a vlastníkovi uvádza aj druh pozemku a na základe druhu pozemku, sa každému vlastníkovi vypočíta výsledná suma, ktorú musí zaplatiť. Pre každé k.ú. sa vypočíta iná sadzba v eurách/ m2. Podľa všeobecne záväzného nariadenia obce Cífer [5]pre k.ú. Pác je základom dane z pozemku pre pozemky orná pôda, chmeľnice, vinice, ovocné sady a trvalé trávnaté porasty hodnota **1,0114 euro/m2**. Základná daň z pozemku pre pozemky druhu záhrada, zastavané plochy a nádvoria a ostatné plochy **1,85 euro/m2** a pre stavebné pozemky **18,58 euro/m2**. Tu nastáva problém, ak vlastník dlhodobo podáva daňové priznanie z dane z nehnuteľností a udáva síce druh pozemku, ktorý sa nachádza na LV ale v realite sa druh pozemku už dávno nezhoduje s druhom pozemku evidovaným v KN.

Zo zákona 162/1995 Z.z. o katastri nehnuteľností [1] vyplýva, že kataster slúži aj na ochranu poľnohospodárskej a lesnej pôdy. V dôsledku urbanizácie a globálneho ohrozenia prírody, by malo byť prioritou každej vyspelej spoločnosti, aby sa vykonávali potrebné kroky k regulovaniu odnímania poľnohospodárskej pôdy na nepoľnohospodárske účely, a tým je primárne výstavba alebo priemyselná činnosť. Katastrálna databáza poskytuje dáta, podľa ktorých sa každoročne vyhotovuje Štatistická ročenka o pôdnom fonde SR [6] ,v ktorom uvádzajú vývoj poľnohospodárskej pôdy na území SR za daný rok. Podľa dát platných k 1. januáru 2025 bol celkový úbytok za rok 2024 celkovo 4425 ha poľnohospodárskej pôdy a 1060 ha ornej pôdy. Tieto hodnoty sa však môžu v značnej miere líšiť od reality a úbytok poľnohospodárskej pôdy môže byť oveľa väčší ako uvádza štatistická ročenka.

Na (Obr. 2) môžeme vidieť meniaci sa druh pozemku v dôsledku urbanizmu. Celá lokalita kedysi slúžila ako ovocný sad. Po čase sa však prestala využívať ako ovocný sad a na základe povolenia výstavby v extraviláne obecným zastupiteľstvom bol pozmenený aj územný plán, v ktorom bola daná lokalita určená k výstavbe. Týmto rozhodnutím, sa automaticky v realite zmenil druh pozemku, no v rámci evidencie katastra došlo len k čiastočným zmenám. V súčasnosti rozhodnutie o zmene/ odňatí z poľnohospodárskeho druhu pozemku vydáva pozemkový a lesný odbor Okresného úradu, ale nie na základe územného plánu, ale až na základe projektovej dokumentácie k jednotlivým stavbám. Tento návrh na zmenu druhu pozemku musí podať vlastník a nie kataster[7].

Obr. 2 Ukážka zmeny druhu pozemku v dôsledku urbanizácie (vľavo za roky 2017 – 2019, v strede za roky 2020 – 2022, vpravo aktuálna snímka vytvorená v auguste 2025)

Ako nástroj na hromadnú zmenu druhu pozemku by v budúcnosti mohla poslúžiť práve revízia údajov KN. Vďaka jednej z moderných technológií, ktorou je UAV fotogrametria, by sa nad oblasťou, ktorá by spadala do revízie vyhotovila aktuálna ortofotomozaika. Na podklade prekrytu aktuálnej vektorovej katastrálnej mapy s ortofotomozaikou je možné v rámci prešetrovania v kancelárii určiť aj nesúlady druhov pozemkov.

Ukážky nesúladov druhov pozemkov evidovaného v KN s terénom sú popísané na nasledujúcich príkladoch. Na (Obr. 3) sú jednotlivé vlastnícke celky znázornené modrou farbou. Jeden vlastnícky celok predstavuje 1 LV. Predmetom prešetrovania bol vlastnícky celok s parcelami p.č. **10406/199, 10406/244, 10406/381, 10406/470, 10406/471 a 10406/490**. Tri parcely sú vedené v KN ako ovocné sady, čo nekorešponduje s terénom. Návrhom opravy nesúladu by bolo zlúčenie troch parciel do jednej parcely p.č. 10406/199 a zmena druhu pozemku z ovocného sadu na záhradu. Na opravenie konkrétne tohto typu nesúladu by na podnet KN vydal pozemkový a lesný odbor rozhodnutie o zlúčení a zmene druhu pozemku a na základe rozhodnutia by kataster vedel tieto zmeny zaevidovať.

Obr. 3 Ukážka druhu pozemku evidovaného v KN pred revíziou (obrázok vľavo) a druhu pozemku po revízii spolu so zlúčením parciel (obrázok vpravo)

Druhým príkladom je obecná cesta, ktorá je v KN vedená ako orná pôda alebo ovocný sad (Obr. 4) Nakoľko sa jedná o pozemky patriace obci Cífer, je len veľmi malá pravdepodobnosť, že cestu postavili načierno. V bežnej praxi existuje množstvo stavieb, ktoré boli postavené na základe stavebného povolenia, boli aj skolaudované, ale nie sú zapísané v KN, lebo o to nepožiadal samotný vlastník. Prílohou k žiadosti o vydanie stavebného povolenia malo byť aj rozhodnutie o zmene druhu

pozemku z odboru pozemkového a lesného. Po kolaudácii je vlastník cesty povinný požiadať o zápis do KN – priložiť GP, rozhodnutie o zmene druhu pozemku a kolaudačné rozhodnutie.

Červenou farbou (Obr. 4) je vyznačený vlastnícky celok patriaci obci. Cesta pozostáva z parciel č. **10406/80, 10406/226, 10406/97 a 10406/9**. Nakoľko sa jedná o parcely v rámci jedného vlastníckeho celku a o rovnaký druh aj spôsob využívania pozemkov, návrhom opravy by bolo zlúčenie parciel do parcely č. 10406/9 s opravou zmeny druhu pozemku z ovocného sadu a role na zastavanú plochu a nádvorie so spôsobom využívania pozemku ako pozemok, na ktorom je postavená inžinierska stavba – cesta, miestna a účelová komunikácia, lesná cesta, poľná cesta, chodník, nekryté parkovisko a ich súčasť (kód 22). V takýchto prípadoch by nebola potrebná prítomnosť vlastníka na revízii. Je to z toho dôvodu, že nebolo potrebné vykonať doplňujúce meranie v teréne, ale zmeny mohli byť vykonané priamo z kancelárie pracovníkom KO OÚ.

Obr. 4 Ukážka druhu pozemku evidovaného v KN pred revíziou (obrázok vľavo) a druhu pozemku po revízii spolu so zlúčením parciel (obrázok vpravo)

Pri oboch prípadoch došlo k zlúčeniu parciel registra C do jednej a k zmene druhu pozemku. V prvom prípade nedošlo k zmene poľnohospodárskeho druhu pozemku na nepoľnohospodársky, ale pre vlastníka to bude znamenať zaplatiť vyššiu daň z pozemku. Výpočet dane z nehnuteľností sa každoročne robí podľa zákona 582/2004 Z.z. o miestnych daniach [4] a podľa všeobecne záväzného nariadenia príslušnej obce [5]. Pre každé katastrálne územie platí iná hodnota pôdy. Ak chceme určiť daň z pozemku postupujeme nasledovne:

1. výmeru a druh pozemku nájdeme uvedenú na LV,
2. sadzbu dane z pravidla nájdeme vo všeobecne záväzných nariadeniach obce,
3. hodnota pôdy závisí aj od druhu pozemku a nájdeme ju v prílohe č. 1 a 2. zákona o miestnych daniach [zdroj],
4. najskôr určíme základ dane ako súčin výmery a hodnoty pozemku podľa druhu pozemku,
5. konečná výška dane bude súčin základnej dane a sadzby dane [8].

To, ako sa zmení výška dane z pozemku pre vlastnícky celok 1 je uvedené (Tab. 1). Je zrejmé, že jednou zmenou pre jeden vlastnícky celok by to znamenalo o 9,13 euro viac pri finálnej platbe z dani z pozemku. Táto suma by sa pripočítala k miestnej dani, ktorú obec berie ako príjem rozpočtu obce a peniaze sa potom ďalej využívajú napríklad pre údržbu miestnych komunikácií, kosenie, osvetlenie, energie, podporu podujatí a pod. Revízia by mala aj veľký prínos v tejto oblasti a dopomohla by k lepšiemu a spravodlivejšiemu vedeniu dane z nehnuteľností. Pre vlastnícky celok 2, popisovaný

v článku platí oslobodenie od platenia daní, nakoľko sa jedná o obecný pozemok, ktorý je využívaný vo verejnom záujme ako cestná komunikácia [4].

Tab. 1 Výpočet dane z pozemku pred a po revízii

Výpočet dane z pozemku pred revíziou							
Vlastnícky celok	p.č.	Výmera na LV [m2]	Druh pozemku	Hodnota v eurách / m2	Výmera [m2]	Sadzba dane [%]	Celková výška dane [euro]
Prvý VL celok	10406/199	223	ovocný sad	1,0114	304	0,60	1,84
	10406/244	32					
	10406/490	49					
Výpočet dane z pozemku po revízii							
Prvý VL celok	10406/199	304	záhrada	1,85	304	1,95	10,97

Podľa štatistickej ročenky platnej k 1. januáru 2025 je v prílohe 2 vidieť pokles výmery poľnohospodárskej pôdy na území SR [6]. Nakoľko tieto dáta vychádzajú z dát vedených v KN, je možné konštatovať, že hodnoty úbytku v ha môžu byť zavádzajúce. Oprava druhov pozemku pomocou revízie údajov KN by mohla prispieť k efektívnej aktualizácii týchto dát.

Záver

Článok sa venuje revízii údajov KN a popisuje ju ako významný nástroj pre systematické zlepšovanie kvality údajov katastrálnych operátov. Výsledky revízie vykonané v k.ú. Pác dokazujú, že aj napriek tomu, že v minulosti prebehlo OKO NM v tomto území, je stále prítomnosť množstva nesúladov medzi stavom evidovaným v KN a stavom skutočným. Vďaka nej je možné odhaliť množstvo nesúladov aj práve medzi druhmi pozemkov.

Využitie UAV fotogrametrie sa ukázalo ako efektívny a presný spôsob zberu aktuálnych priestorových údajov, na podklade ktorých je možné porovnávať existujúce vektorové katastrálne mapy (VKM) s reálnym stavom v teréne. Na podklade ortofotomozaiky je možné identifikovať chyby a nesúlady bez potreby rozsiahleho terénneho merania, čím sa znižujú aj potrebné finančné náklady pre aktualizáciu údajov KN.

Článok sa ďalej zaoberá aj zistenými nesúladmi druhov pozemkov a popisuje aj ekonomický dopad predovšetkým v oblasti výpočtu dane z nehnuteľností. Potvrdilo sa, že nesprávne vedenie druhov pozemkov v databázach KN vedú aj k finančným stratám obcí. Vďaka revízii by sa tieto nesúlady pravidelne odstraňovali, čo by malo významný vplyv na presnejšie stanovenie dane podľa reálneho využívania územia. Jej druhou výhodou je aj environmentálny prínos a vďaka revízii by bolo možné spresniť obraz o úbytku poľnohospodárskej pôdy. Tak by sa dalo objektívnejšie vyhodnocovať dopady stavebného rozvoja na životné prostredie.

Poďakovanie
„Tento článok vznikol vďaka podpore Fondu Slavojovcov“

Literatúra

[1] Národná rada Slovenskej republiky, *Zákon o katastri nehnuteľností a o zápise vlastníckych a iných práv k nehnuteľnostiam (katastrálny zákon)*, roč. 1995. 2025. [Online]. Available at: https://www.slov-lex.sk/ezbierky/pravne-predpisy/SK/ZZ/1995/162/19960724

[2] R. Jakubáč a R. Fečík, *Katastrálny zákon. Komentár*, 1. vydanie. Bratislava: Nakladatelství C.H. Beck, 2021.
[3] Úrad geodézie, kartografie a katastra SR, "Výročná správa 2024", Úrad geodézie, kartografie a katastra SR, máj. 2025. [Online]. Available at: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.skgeodesy.sk/files/sk/slovensky/ugkk/kontrakty-vyrocne-spravy/ugkk-sr_vyrocna_sprava_2024.pdf
[4] Národná rada Slovenskej republiky, *Zákon o miestnych daniach a miestnom poplatku za komunálne odpady a drobné stavebné odpady*, roč. 2004. Cit: 25. október 2025. [Online]. Available at: https://www.slov-lex.sk/ezbierky/pravne-predpisy/SK/ZZ/2004/582/
[5] Obec Cífer, *Všeobecne záväzné nariadenie obce Cífer č. 4/2024 o miestnych daniach a miestnom poplatku za komunálne odpady a drobné stavebné odpady*, roč. 4/2024. 2025, s. 16. [Online]. Available at: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.cifer.sk/e_download.php?file=data/uredni_deska/obsah2462_1.pdf&original=VZN_4_2024_o_miestnych%20daniach%20a%20miestnom%20poplatku%20za%20KO%20a%20DSO.pdf
[6] Úrad geodézie, kartografie a katastra Slovenskej republiky, "Štatistická ročenka o pôdnom fonde v Slovenskej republike", Úrad geodézie, kartografie a katastra SR, Bratislava, 2025. [Online]. Available at: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.skgeodesy.sk/files/sk/slovensky/ugkk/kataster-nehnutelnosti/sumarne-udaje-katastra-podnom-fonde/rocenky-2024-obaltext-pdf.pdf
[7] Národná rada Slovenskej republiky, *o ochrane a využívaní poľnohospodárskej pôdy a o zmene zákona č. 245/2003 Z. z. o integrovanej prevencii a kontrole znečisťovania životného prostredia a o zmene a doplnení niektorých zákonov*, roč. 2004. [Online]. Available at: https://www.slov-lex.sk/ezbierky/pravne-predpisy/SK/ZZ/2004/220/20250601.html
[8] O. Halama, *Pozemky, stavby, byty*. Liptovský Mikuláš: Elist, 2019.

THEORY AND ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY OF BUILDINGS

Karolína Gábrišová[1]
Študijný program: Teória a technika prostredia budov, 2. ročník

KVALITA VNÚTORNÉHO PROSTREDIA V TELOCVIČNIACH ZÁKLADNÝCH ŠKÔL

INDOOR ENVIRONMENTAL QUALITY IN PRIMARY SCHOOL GYMNASIUMS

Abstract
The indoor environmental quality (IEQ) of school gymnasiums has a crucial impact on the health, performance, and comfort of children and youth. Gymnasiums represent specific high-occupancy spaces with fluctuating thermal loads and are often operated without controlled ventilation. This paper presents an experimental evaluation of IEQ parameters in a primary school gymnasium located in Veľké Úľany, Slovakia, during the winter and summer seasons. Measurements of temperature, relative humidity, CO_2 concentration, and solar radiation intensity were recorded at 5-minute intervals for three weeks in January and also in June 2025. The findings highlight the necessity of implementing controlled ventilation and solar shading measures to maintain optimal IEQ throughout the year.

Kľúčové slová / Key Words
vnútorné prostredie; kvalita vzduchu; telocvičňa, deti a mládež; vetranie; experimentálne meranie

1. Úvod

Vnútorné prostredie školských športových zariadení významne ovplyvňuje zdravie, pohodu a výkonnosť detí a mládeže. Počas vyučovacích hodín telesnej výchovy dochádza k intenzívnej fyzickej aktivite, ktorá vedie k zvýšenej produkcii oxidu uhličitého, tepla a vlhkosti. V mnohých telocvičniach na Slovensku však absentujú systémy riadeného vetrania, čo vedie k zhoršenej kvalite vzduchu, prekračovaniu limitných koncentrácií CO_2 a k poklesu komfortu užívateľov.

V poslednom období sa zároveň ukazuje potreba hodnotiť vnútorné prostredie aj z hľadiska sezónnych rozdielov. Zatiaľ čo v zimnom období dominuje problém nedostatočného vetrania, v letnom období je hlavným problémom prehrievanie a vysoké tepelné zisky zo slnečného žiarenia.

Cieľom tohto príspevku je porovnať kvalitu vnútorného prostredia v telocvični základnej školy, ktorá je vetraná prirodzeným spôsobom, počas zimného a letného obdobia a analyzovať vplyv slnečného žiarenia na teplotu a tepelný komfort.

2. Požiadavky na kvalitu vnútorného prostredia v telocvičniach

Kvalita vnútorného prostredia v školských športových zariadeniach je v Slovenskej republike definovaná kombináciou národných hygienických predpisov, technických noriem a medzinárodných štandardov. Tieto dokumenty určujú hraničné hodnoty teploty, vlhkosti, koncentrácie oxidu uhličitého, intenzity výmeny vzduchu a akustických parametrov, ktoré majú zabezpečiť zdravé a komfortné prostredie pre deti a mládež.

[1] Karolína Gábrišová, Ing., Stavebná fakulta STU Bratislava, Katedra TZB, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2.1 Národné právne predpisy a technické normy

Základným predpisom je vyhláška MZ SR č. 259/2008 Z. z. o požiadavkách na vnútorné prostredie budov, ktorá stanovuje hygienické limity teploty, relatívnej vlhkosti a intenzity výmeny vzduchu pre jednotlivé druhy priestorov. Pre telocvične základných škôl sa požaduje teplota 15 - 17 °C, relatívna vlhkosť 30 - 70 % a minimálna intenzita výmeny vzduchu 5 h^{-1} [1].

Vyhláška MŠVVaŠ SR č. 75/2023 Z. z. ďalej určuje priestorové požiadavky: minimálne 4 - 8 m^2 na žiaka podľa typu pohybovej aktivity a hygienické zázemie s plochou šatne min. 0,5 m^2 na žiaka [2].

Technická norma STN EN 16798-1:2019 definuje kategórie vnútorného prostredia (I - IV) podľa očakávanej kvality a navrhovaných limitov koncentrácie CO_2 nad vonkajšou hodnotou. Pre priestory s vyššou fyzickou aktivitou ako sú telocvične, sa odporúča kategória II alebo III ($\Delta CO_2 \leq$ 800 - 1200 ppm) [3].

Tabuľka 1: Požiadavky na vnútorné prostredie školských telocviční podľa SR legislatívy [1, 2, 3]

Parameter	Vyhláška MZ SR č. 259/2008 Z. z.	STN EN 16798-1:2019	Vyhláška MZ SR č. 75/2023 Z. z.
Teplota vzduchu (°C)	15 - 17	min. 16	min. 15
Relatívna vlhkosť (%)	30 - 70	30 - 70	–
Prietok vonkajšieho vzduchu (m^3/(hod.os))	–	–	30
Intenzita výmeny vzduchu (h^{-1})	≥ 5	4 - 8 (odporúčané)	–
ΔCO_2 nad exteriérom (ppm)	–	≤ 800 - 1200	–
Plocha na osobu (m^2/žiak)	–	–	4 - 8
Hluk (dB(A))	–	≤ 40 - 45	–

Tieto predpisy vytvárajú základ pre návrh a hodnotenie kvality vnútorného prostredia v školských športových objektoch. V praxi však dochádza k častému prekračovaniu odporúčaných hodnôt koncentrácie CO_2, najmä pri prirodzene vetraných telocvičniach.

2.2 Medzinárodné odporúčania ASHRAE

Americká spoločnosť ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) poskytuje v rámci svojich štandardov a príručiek komplexný rámec pre navrhovanie systémov HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) v školách a športových zariadeniach. Odporúčania vychádzajú zo štandardov ASHRAE 62.1-2022, ASHRAE Handbook - Fundamentals (2017) a HVAC Applications (2019) [4, 5, 6].

Pre telocvične (gymnasiums – playing floors) sa odporúča zabezpečiť:

Tabuľka 2: Odporúčania ASHRAE pre športové priestory (Gymnasium - playing floor) [4, 5, 6]

Parameter	Odporúčanie ASHRAE
Prietok vonkajšieho vzduchu	1,5 l/(s.m^2); 10 l/(s.os)
Filtračná trieda	MERV 8 - 13
Intenzita výmeny vzduchu	4 - 6 h^{-1}
Teplota	18 - 20 °C

Relatívna vlhkosť	30 - 60 %
Hluk HVAC	50 (dB(A))

ASHRAE odporúča pre školské športové priestory flexibilné riadenie vetrania podľa aktuálnej obsadenosti (tzv. *demand-controlled ventilation*) a udržiavanie vlhkosti medzi 35-50 % s cieľom predchádzať rastu plesní a zachovať akustický komfort, hlavne pri drevených podlahách [6].

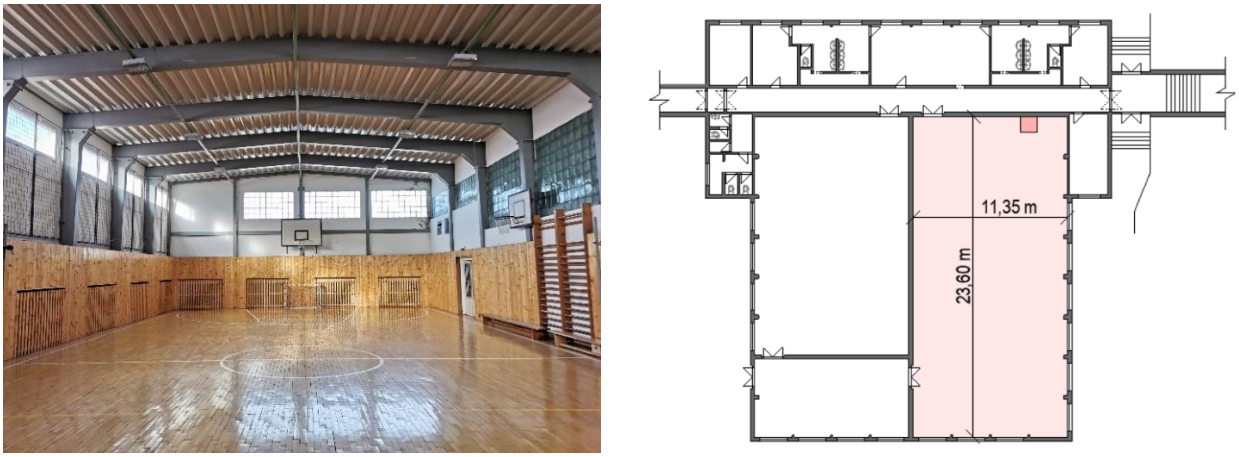
3. Experimentálne merania

Experimentálne merania boli realizované v telocvični Základnej školy Mikuláša Lieskovského vo Veľkých Úľanoch, ktorá tvorí súčasť komplexu školskej budovy s dvomi športovými priestormi - väčšou a menšou telocvičňou, kabinetom pre učiteľa, skladom športového náradia a šatňami s hygienickým zázemím pre dievčatá a chlapcov.

Merania sa uskutočnili vo veľkej telocvični s pôdorysnými rozmermi 23,6 x 11,35 m a svetlou výškou približne 5,5 m. Priestor je vetraný prirodzene - výmena vzduchu prebieha cez šesť otvárateľných okien situovaných vedľa seba (obr. 1).

Konštrukčne ide o tehlovú budovu so železobetónovým stropom, bez systému chladenia či rekuperácie tepla. Osvetlenie a solárne tepelné zisky zabezpečujú rozsiahle presklené plochy po oboch obvodových stenách haly. Telocvičňa slúži na vyučovanie telesnej výchovy žiakov vo veku 7 - 15 rokov, pričom typická obsadenosť počas vyučovacej hodiny je 20 až 25 osôb.

V zimnom období sa priestor vykuruje prostredníctvom teplovodných konvekčných telies, v letnom období objekt nie je chladený. Z hľadiska vnútorného prostredia ide o reprezentatívny príklad slovenskej školskej telocvične s prirodzeným vetraním, čo umožňuje porovnať skutočné mikroklimatické podmienky s požiadavkami platných noriem a medzinárodných štandardov.



a) b)

Obrázok 1: a) Telocvičňa ZŠ Veľké Úľany z interiéru b) Pôdorys telocvične s vyznačením miesta merania

3.1 Cieľ merania

Cieľom experimentálnych meraní bolo analyzovať kvalitu vnútorného prostredia v telocvični základnej školy počas dvoch sezón - zimného a letného obdobia - s dôrazom na hodnotenie tepelno-vlhkostných podmienok, koncentrácie oxidu uhličitého a vplyvu slnečného žiarenia cez presklené konštrukcie.

Merania boli zamerané na overenie, či telocvičňa spĺňa požiadavky noriem a predpisov uvedených v kapitole 2 a na identifikáciu sezónnych rozdielov, ktoré ovplyvňujú komfort používateľov a účinnosť prirodzeného vetrania.

3.2 Metodika merania

3.2.1. Metodika merania z hľadiska meraných parametrov vnútorného prostredia

Merané boli nasledujúce fyzikálne veličiny vnútorného vzduchu:

- teplota (°C),
- relatívna vlhkosť (%),
- koncentrácia oxidu uhličitého CO_2 (ppm),
- intenzita slnečného žiarenia (W/m²) (iba počas letných meraní).

Tieto veličiny sú rozhodujúce pre hodnotenie kvality vnútorného prostredia.

3.2.2. Metodika merania z hľadiska času a podmienok

Merania prebiehali v dvoch samostatných obdobiach:

- Zimné obdobie: 8. – 28. januára 2025 od 8:00 h,
- Letné obdobie: 30. mája – 20. júna 2025 od 8:00 h.

V oboch prípadoch boli hodnoty zaznamenávané v 5-minútových intervaloch počas celého dňa vrátane vyučovacích hodín, prestávok a vo večerných hodinách, kedy bola telocvičňa využívaná verejnosťou.

Zimné merania prebiehali pri priemerných vonkajších teplotách okolo 2,1 °C, letné merania pri 22,8 °C. Počas meraní sa v priestore nachádzalo 20 - 25 žiakov a učiteľ telesnej výchovy [7].

3.2.3. Metodika merania z hľadiska použitých meracích zariadení

Na meranie parametrov vnútorného prostredia bol použitý multifunkčný prístroj Testo 400, doplnený o špecializované sondy pre meranie teploty vnútorného vzduchu, relatívnej vlhkosti, koncentrácie oxidu uhličitého a rýchlosti prúdenia vzduchu. Prístroj bol umiestnený do ochrannej kovovej klietky, čím sa zabezpečila stabilita a ochrana zariadenia pred nárazmi počas vyučovacích hodín telesnej výchovy (obr. 2).

Okrem hlavnej meracej zostavy Testo 400 boli použité aj snímače CO_2 s dataloggermi Comet Vision, ktoré boli upevnené na zvislom lane v rôznych výškových úrovniach (obr. 2). Takéto vertikálne rozloženie meracích bodov umožnilo hodnotiť stratifikáciu teploty vzduchu a zmeny koncentrácie CO_2 v závislosti od výšky.

Počas letných meraní bol systém doplnený o pyranometer Ahlborn Almemo, ktorý zaznamenával intenzitu dopadajúceho slnečného žiarenia (W/m²) na streche telocvične. Údaje zo žiarenia boli využité na posúdenie vplyvu solárnych ziskov na teplotu a tepelný komfort v priestore.

a)

b)

Obrázok 2: a) Použité meracie prístroje v telocvični: zostava Testo 400, dataloggery Comet Vision b) Použitý merací prístroj na streche telocvične: pyranometer Ahlborn Almemo

3.2.4. Metodika merania z hľadiska umiestnenia meracích zariadení

Meracie zariadenia boli umiestnené na okrajovej časti telocvične tak, aby sa dala telocvičňa využívať aj počas kontinuálnych meraní, ale zároveň aby neboli výsledky ovplyvnené prúdením vzduchu z otvorených okien ani priamym slnečným žiarením.

Merania pomocou Testo 400 boli realizované v štyroch výškových úrovniach, ktoré zodpovedajú antropometrickým výškam rôznych častí tela osoby:

- 1,70 m - úroveň hlavy stojacej osoby,
- 1,10 m - úroveň hlavy sediacej osoby / úroveň trupu stojacej osoby,
- 0,60 m - úroveň trupu sediacej osoby,
- 0,10 m - úroveň členkov osoby.

Nad touto zostavou boli vo výškach 2,30 m, 3,30 m, 4,30 m a 5,30 m umiestnené snímače CO_2 s dataloggerom Comet Vision pre monitoring vo vyšších úrovniach priestoru. Takéto usporiadanie umožnilo vytvoriť vertikálny profil ôsmich meracích bodov (obr. 2).

Pyranometer Ahlborn Almemo bol umiestnený na streche telocvične, avšak len počas letných meraní.

4. Výsledky meraní a analýza výsledkov

4.1 Zimné obdobie

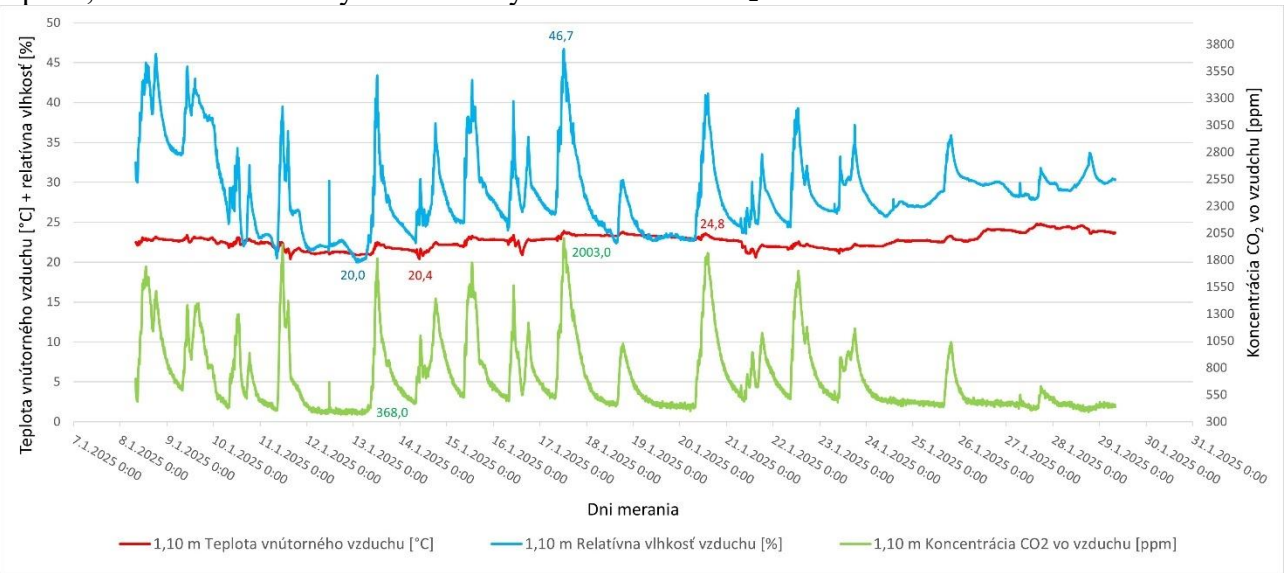
Počas zimného meracieho obdobia sa vnútorná teplota vzduchu pohybovala v rozmedzí 20,4 až 24,8 °C. Tieto hodnoty prekračujú odporúčané teploty podľa vyhlášky MZ SR č. 259/2008 Z. z., ktorá pre školské telocvične stanovuje optimálny rozsah 15 - 17 °C, a zároveň sa nachádzajú v hornej časti rozsahu odporúčaného normou STN EN 16798-1:2019 (16 - 25 °C). Vyššie teploty možno pripísať nízkej intenzite vetrania a akumulácii tepla z vykurovania počas neprerušovanej prevádzky.

Relatívna vlhkosť vzduchu sa pohybovala v intervale 20 až 46,7 %, čo znamená, že počas väčšiny meraní boli tieto hodnoty pod hranicou 30 % podľa slovenských aj zahraničných odporúčaní. Suché prostredie je typické pre vykurované priestory s nedostatočnou výmenou vzduchu a môže viesť k zníženému komfortu a podráždeniu slizníc.

Najzávažnejším zistením boli hodnoty koncentrácie oxidu uhličitého, ktoré počas vyučovacích hodín dosahovali až 2 003 ppm, čo má výrazný vplyv na pozornosť detí a možnú bolesť hlavy alebo

pocitu „vydýchaného vzduchu‘‘. Priebeh koncentrácie jasne kopíroval využívanie priestoru - nárasty počas vyučovania a poklesy pri vetraní - čo potvrdzuje absenciu núteného vetrania a závislosť kvality vzduchu od správania užívateľov.

V porovnaní s požiadavkami uvedenými v Tabuľke 1 a 2 možno zimné podmienky hodnotiť ako nevyhovujúce z hľadiska kvality vnútorného prostredia, pričom hlavným problémom bola vysoká teplota, nízka vlhkosť a zvýšené hodnoty koncentrácie CO_2.



Obrázok 3: Parametre kvality vnútorného vzduchu počas zimného merania v telocvični vo Veľkých Úľanoch

4.2 Letné obdobie

Počas letného meracieho obdobia sa vnútorná teplota vzduchu pohybovala v rozmedzí 19,6 až 26,7 °C, pričom maximálne hodnoty výrazne prekračovali odporúčanú hranicu stanovenú vo vyhláške MZ SR č. 259/2008 Z. z. pre športové priestory. Vyššie teploty sú dôsledkom solárnych ziskov cez presklené plochy, ktoré neboli tienené, a akumulácie tepla v konštrukciách počas dňa.

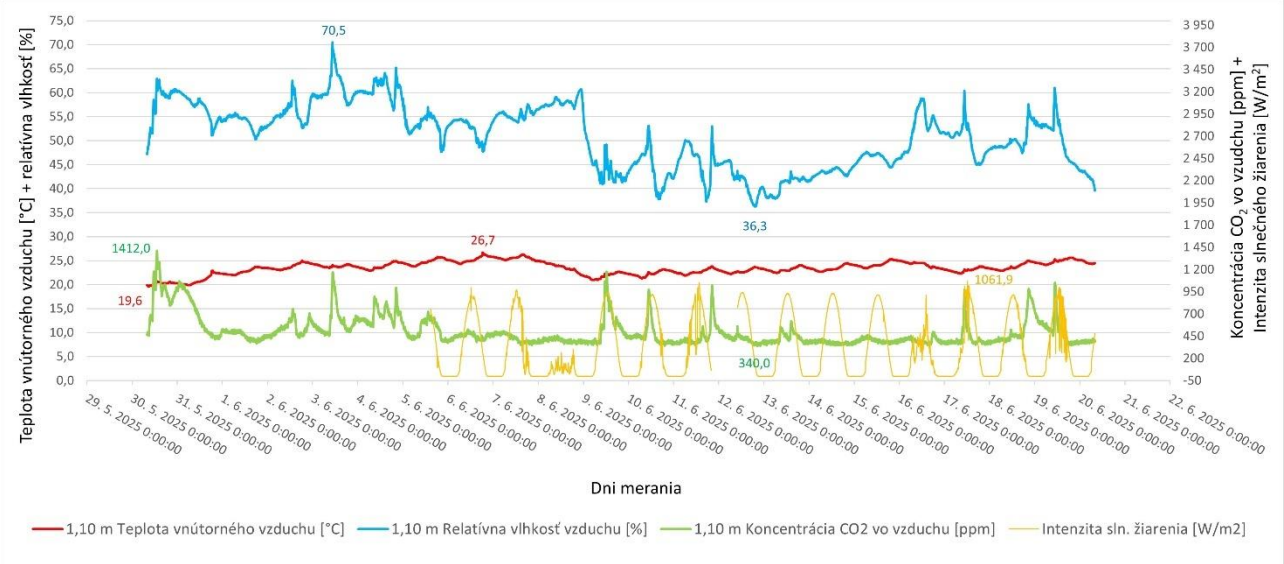
Relatívna vlhkosť sa pohybovala v rozsahu 36,3 až 70,5 %, teda v súlade s požiadavkami slovenskej legislatívy a americkej ASHRAE.

Koncentrácia oxidu uhličitého bola po celé obdobie výrazne nižšia než v zime - v intervale 340 až 1 412 ppm. Tento rozdiel možno vysvetliť tým, že počas letných dní sa hodiny telesnej výchovy konali prevažne vo vonkajšom prostredí, zatiaľ čo telocvičňa zostávala väčšinu času neobsadená alebo prirodzene vetraná otvorenými oknami. Vďaka tomu sa koncentrácie CO_2 udržiavali na úrovni, ktorá neprekračovala hygienické limity ani pri krátkodobom využití priestoru.

Na druhej strane, zvýšené teploty v popoludňajších hodinách poukazujú na riziko prehrievania priestoru, ktoré by sa pri plnej obsadenosti pravdepodobne ešte zvýraznilo.

Zároveň bol pozorovaný vplyv solárnych ziskov na teplotné pomery v interiéri. Počas dní s vysokou intenzitou slnečného žiarenia došlo k postupnému zvyšovaniu vnútornej teploty aj bez obsadenosti priestoru, čo poukazuje na nedostatočné tienenie juhozápadnej fasády a nízku akumulačnú schopnosť objektu. Tento jav môže v letných mesiacoch významne zhoršiť tepelný komfort a poukazuje na potrebu návrhu opatrení, ako je exteriérové tienenie alebo nočné prevetrávanie.

V porovnaní s požiadavkami uvedenými v Tabuľke 1 a 2 možno konštatovať, že letné podmienky boli vyhovujúce z hľadiska kvality vzduchu, avšak kritické z pohľadu tepelného komfortu. Výsledky poukazujú na potrebu tienenia juhozápadnej fasády, prípadne nočného vetrania alebo pasívneho chladenia ako efektívnych opatrení pre zlepšenie mikroklimatických podmienok v letnom období.



Obrázok 4: Parametre kvality vnútorného vzduchu počas letného merania v telocvični vo Veľkých Úľanoch

5. Pripravované merania

V nadväznosti na prezentované výsledky sú plánované ďalšie experimentálne merania v novej telocvični v Modranke (mestská časť Trnavy), ktorá predstavuje moderný objekt drevostavby so systémom núteného vetrania s centrálnou rekuperačnou jednotkou. Cieľom je realizovať zimné aj letné merania v rovnakom rozsahu ako v prípade telocvične vo Veľkých Úľanoch, s cieľom porovnať vplyv rozdielnych stavebno-technických riešení a systémov vetrania na kvalitu vnútorného prostredia.

Osobitná pozornosť bude venovaná monitorovaniu koncentrácie CO_2, teplotnej a vlhkostnej stability, ako aj tepelnej stratifikácie v priestore s núteným vetraním. Očakáva sa, že výsledky umožnia kvantifikovať prínos núteného vetrania z hľadiska hygieny vzduchu a komfortu používateľov, a prispejú k tvorbe odporúčaní pre návrh a prevádzku školských športových zariadení.

6. Záver

Experimentálne merania v školskej telocvični preukázali, že kvalita vnútorného prostredia sa výrazne mení v závislosti od sezóny a spôsobu vetrania.

Počas zimného obdobia boli zaznamenané vysoké koncentrácie CO_2 (až 2 000 ppm) a nízka relatívna vlhkosť vzduchu pod 30 %, čo poukazuje na nedostatočné vetranie a zhoršené hygienické podmienky. Naopak, v letnom období bola kvalita vzduchu z hľadiska CO_2 vyhovujúca, avšak teploty presahovali komfortné hranice, najmä v dôsledku vysokých solárnych ziskov a absencie tienenia.

Porovnanie s legislatívnymi požiadavkami podľa vyhlášky MZ SR č. 259/2008 Z. z., STN EN 16798-1:2019 a ASHRAE 62.1-2022 potvrdilo, že existujúce školské telocvične bez núteného vetrania nie sú schopné dlhodobo zabezpečiť požadovanú kvalitu vnútorného prostredia. Získané výsledky jednoznačne naznačujú potrebu zavedenia núteného vetrania s rekuperáciou tepla, doplneného o tienenie presklených plôch a nočné vetranie na zníženie tepelných ziskov počas letného obdobia.

Budúce merania plánované v novej drevostavbe telocvične v Modranke umožnia komplexnejšie posúdenie účinnosti moderných systémov vetrania a ich vplyvu na kvalitu a stabilitu vnútorného prostredia počas rôznych ročných období.

Poďakovanie

Túto prácu podporila Slovenská agentúra pre výskum a vývoj na základe zmluvy č. APVV-21-0144 a Ministerstvo školstva, vedy, výskumu a športu SR grant VEGA 1/0118/23.

Rovnako tak je dôležité poďakovať VUT Stavební fakulta, Ústav TZB za zapožičanie meracích prístrojov.

Literatúra

[1] Vyhláška MZ SR č. 259/2008 Z. z. o podrobnostiach o požiadavkách na vnútorné prostredie budov a o minimálnych požiadavkách na byty nižšieho štandardu a na ubytovacie zariadenia.
[2] Vyhláška MZ SR č. 75/2023 Z. z. o podrobnostiach o požiadavkách na zariadenia pre deti a mládež.
[3] STN EN 16798-1:2019 Energetická hospodárnosť budov. Vetranie budov. Časť 1: Vstupné údaje o vnútornom prostredí budov na navrhovanie a hodnotenie energetickej hospodárnosti budov – kvalita vzduchu, tepelný stav prostredia, osvetlenie a akustika. Modul M1-6.
[4] ASHRAE. (2017). *ASHRAE Handbook – Fundamentals (SI Edition).* American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
[5] ASHRAE. (2019). *ASHRAE Handbook – HVAC Applications (SI Edition).* American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
[6] ASHRAE. (2022). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022: Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality.* American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
[7] SHMÚ. Slovenský hydrometeorologický ústav. Mesačné teploty vzduchu v roku 2025. Dostupné na: https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=klimat_operativneudaje1&identif=11816&rok=2025&obdobie=1991-2020&sub=3

Lucia Hrnčárová
Študijný program: Teória a technika prostredia budov, 4.ročník

EXPERIMENTÁLNE MERANIE REKUPERAČNÉHO SYSTÉMU PRE VYUŽITIE ODPADOVEJ VODY ZO SPRCHY

EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF A HEAT RECOVERY SYSTEM FOR UTILIZING WASTE WATER FROM A SHOWER

Abstract

The term "energy crisis" has become increasingly widespread in recent years, bringing with it a strong emphasis on reducing overall energy consumption. For most people, this concept is primarily associated with thermal insulation, improving the thermal performance of buildings, or implementing renewable energy systems. While such measures effectively reduce energy demand for space heating, the amount of energy required for domestic hot water preparation remains nearly unchanged. In every household, a significant volume of hot water is produced and subsequently discharged into the sewage system without further use. However, with appropriate technical solutions, it is possible to recover heat from wastewater, thereby improving overall energy efficiency.

Kľúčové slová / Key Words

experimentálne merania; sprchový výmenník tepla; príprava teplej vody

1. Úvod

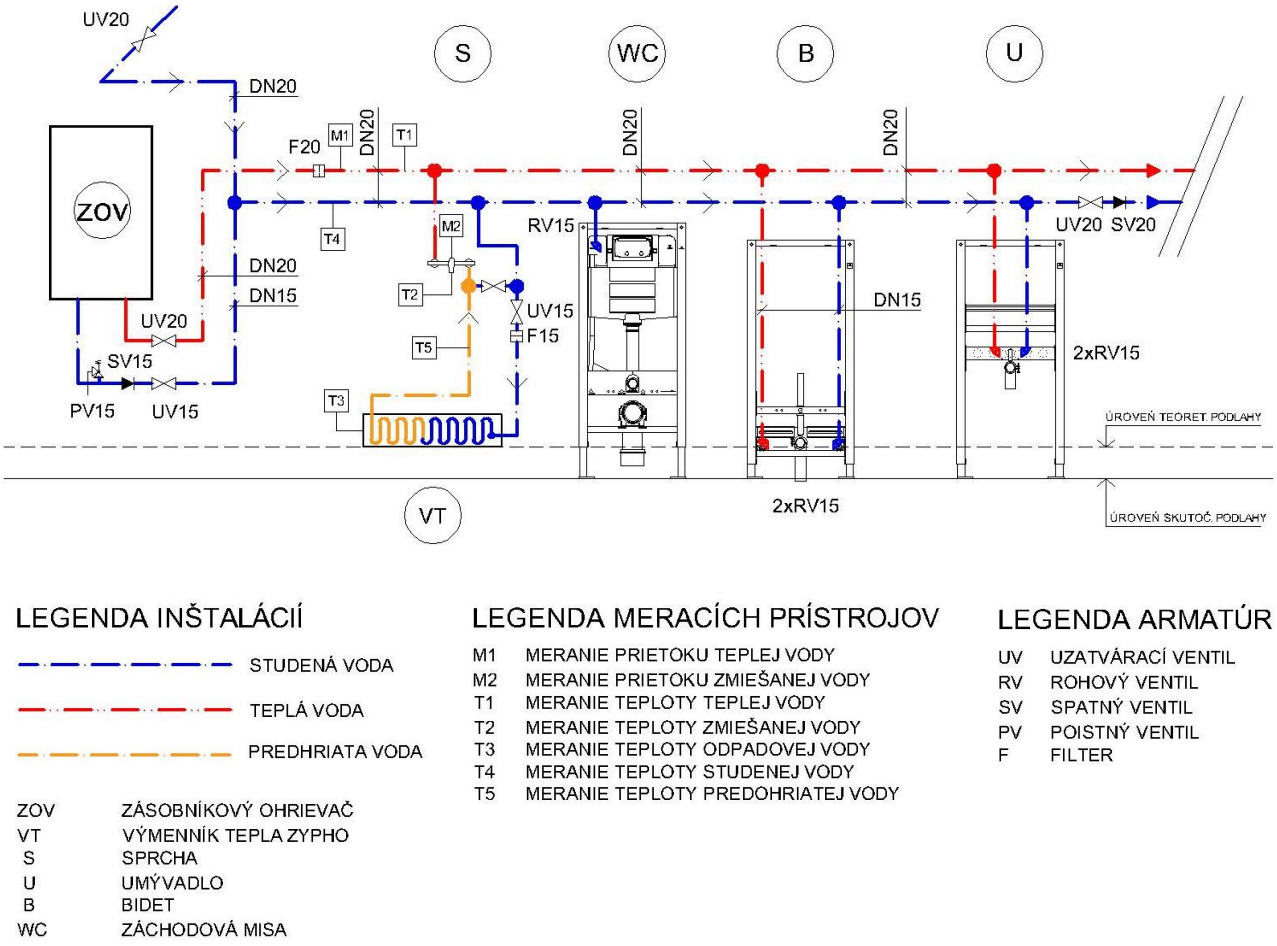
V súčasnosti je veľmi rozšírené slovné spojenie „energetická kríza" a s ním spojené aj potrebné znižovanie energií. Pod týmito slovami si väčšina populácie predstaví hlavne zatepľovanie, resp. zlepšovanie tepelno-technických vlastností budov, či návrh obnoviteľných zdrojov energie. Tieto opatrenia však znižujú energie na vykurovanie, avšak množstvo energie na prípravu teplej vody ostáva takmer rovnaké. V každej domácnosti je každodenne pripravené množstvo teplej vody, ktorá sa bez ďalšieho využitia dostáva do kanalizačných systémov, pričom pri správnom technickom riešení je možné teplo z odpadovej vody spätne využiť.

2. Príprava teplej vody pomocou odpadového tepla z kanalizácie

Teplota odpadovej vody v kanalizačných potrubiach môže napríklad pri odtekaní zo sprchy dosahovať až 38 °C, z automatickej práčky v niektorých prípadoch až 60 °C. Teplotu vypúšťanej splaškovej vody je možné využiť na prenos energie z odpadovej vody na studenú vodu vo výmenníku tepla. Výmenník tepla pozostáva spravidla z potrubia, v ktorom prúdi studená voda a je ovinuté okolo kanalizačného potrubia. Odpadová voda prenáša svoju tepelnú energiu na studenú vodu cez dve steny potrubia, čiže sú látky oddelené dvojitou stenou podľa STN EN 1717 [1]. Studená voda po prijatí tepelnej energie dokáže navýšiť svoju teplotu až o niekoľko °C. Následne studená voda s vyššou teplotou prúdi napríklad do termostatickej zmiešavacej výtokovej armatúry sprchy. V sprchovej batérii dochádza k miešaniu teplej vody zo zásobníkového ohrievača a predohriatej studenej vody z výmenníka tepla. Predpokladáme, že zvýšením teploty studenej vody a jej následným miešaním s teplou vodou bude potrebné menšie množstvo celkovej tepelnej energie na dosiahnutie požadovanej teploty vody v sprche. Pre zistenie presnejších údajov o spotrebovanom množstve teplej vody boli vykonané merania v laboratórnych podmienkach.

3. Meranie rekuperačného systému odpadovej vody v laboratórnych podmienkach

Laboratórium sa nachádza na 23. poschodí v budove Stavebnej fakulty. Zostava hygienických zariadení pre experimentálne merania bola realizovaná v rokoch 2013 - 2016 a prešla čiastočnou rekonštrukciou v lete 2025. Meracia zostava pozostáva zo sprchy, umývadla, záchodovej misy a bidetu. Vzhľadom na to, že laboratórium sa nachádza v najvyššom podlaží bloku C, v potrubí existujúcej studenej vody neboli dostatočné tlakové podmienky. Na zvýšenie tlaku vody je inštalovaná tlaková stanica DAB E.SYBOX. Tlaková stanica je v súčasnosti nastavená na prevádzkový tlak 3,7 bar. Do miestnosti je privedená iba studená voda, takže teplá voda pre účely sprchovania a umývania je pripravovaná v elektrickom zásobníkovom ohrievači Tatramat EO 100 EL s objemom 100 litrov. Vodovodné potrubia sú vyhotovené z plasthliníkových potrubí Geberit Mepla a kanalizačné potrubia Geberit Silent. Sprcha je vybavená sprchovacou termostatickou batériou. Schéma meracej zostavy je vyobrazená na Obrázku 1.



LEGENDA INŠTALÁCIÍ

	STUDENÁ VODA
	TEPLÁ VODA
	PREDHRIATA VODA

ZOV	ZÁSOBNÍKOVÝ OHRIEVAČ
VT	VÝMENNÍK TEPLA ZYPHO
S	SPRCHA
U	UMÝVADLO
B	BIDET
WC	ZÁCHODOVÁ MISA

LEGENDA MERACÍCH PRÍSTROJOV

M1	MERANIE PRIETOKU TEPLEJ VODY
M2	MERANIE PRIETOKU ZMIEŠANEJ VODY
T1	MERANIE TEPLOTY TEPLEJ VODY
T2	MERANIE TEPLOTY ZMIEŠANEJ VODY
T3	MERANIE TEPLOTY ODPADOVEJ VODY
T4	MERANIE TEPLOTY STUDENEJ VODY
T5	MERANIE TEPLOTY PREDOHRIATEJ VODY

LEGENDA ARMATÚR

UV	UZATVÁRACÍ VENTIL
RV	ROHOVÝ VENTIL
SV	SPATNÝ VENTIL
PV	POISTNÝ VENTIL
F	FILTER

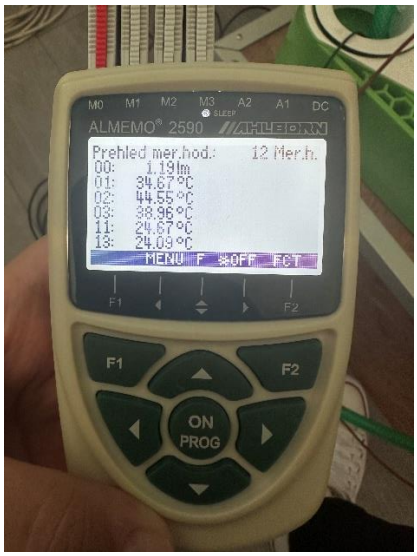
Obrázok 1 Schéma meracej zostavy v laboratóriu

Merania boli uskutočnené tak, že zo sprchovej batérie je napojená hadica dĺžky 1,5 metra, ktorá ústi priamo do výmenníka tepla. Merania boli doposiaľ vykonávané v tejto časti zostavy. Výmenník tepla pozostáva z plastového boxu, cez ktoré je vedené kanalizačné potrubie zo sprchy, okolo ktorého je ovinuté potrubie studenej vody. Potrubie studenej (predohriatej) vody z výmenníka prúdi do termostatickej sprchovej batérie. V rámci meraní je potrebné porovnávať hodnoty bez a s výmenníkom tepla, preto je zabezpečený prívod vody aj bezpečnostným obtokom. V prípade sprchovania bez výmenníka tepla sa uzatvorí ventil na prívode studenej vody do VT a do sprchovej batérie je privádzaná studená voda priamo z bežného vodovodného rozvodu (Obrázok 1).

Obrázok 2 Časť meracej zostavy s výmenníkom tepla Zypho (VT1)

Experimentálne merania na meracej zostave (Obrázok 2) boli vykonávané v dvoch etapách - v júli a októbri 2025. Vzhľadom na to, že na účinnosť rekuperačného systému má vplyv mnoho faktorov a jedným z nich je aj doba sprchovania, uvažovalo sa so 6 a 10 minútovým intervalom. Pre každú dobu sprchovania boli merané 2 cykly bez výmenníka tepla a 2 cykly s výmenníkom tepla v letnom a aj jesennom období, aby sa následne mohli porovnať.

Počas meracích cyklov bolo meraných 6 veličín: prietok teplej vody, teplota teplej vody, teplota zmiešanej vody, teplota odpadovej vody, teplota studenej vody a teplota predohriatej studenej vody. Prietok teplej vody a teploty teplej vody, zmiešanej vody, odpadovej vody, studenej vody a predohriatej studenej vody boli pre experimentálne účely v oboch obdobiach merané prístrojom ALMEMO 2590 (Obrázok 3). Prietok a teplota vody v termostatickej sprchovej batérii bola meraná prístrojom Kemper Control Plus (Obrázok 4).

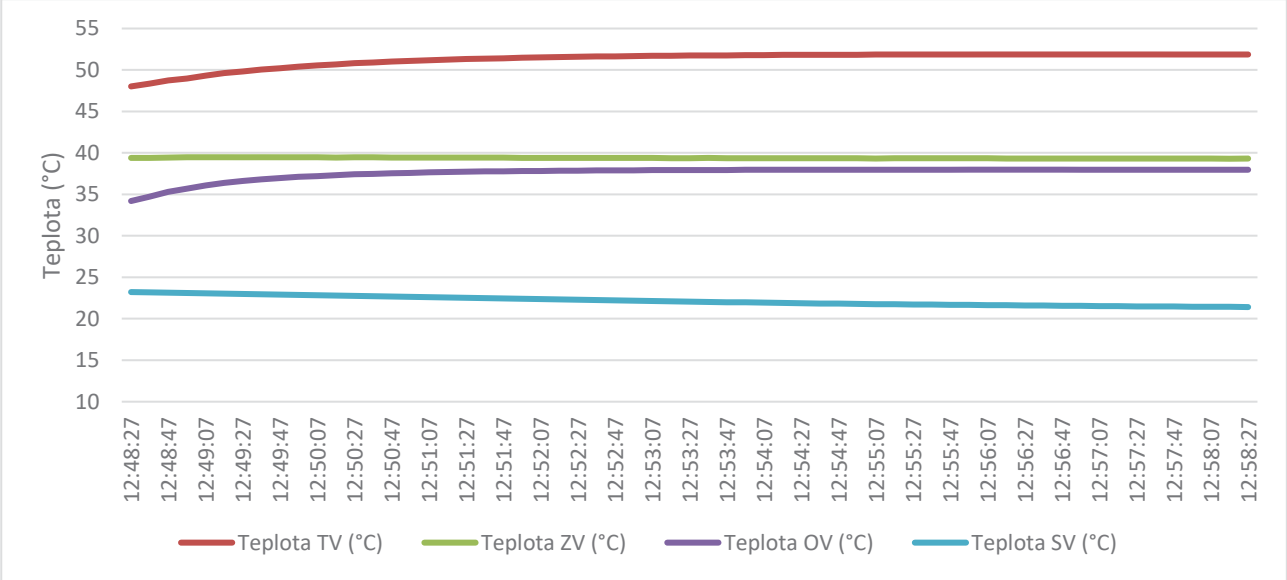


Obrázok 3 ALMEMO 2590

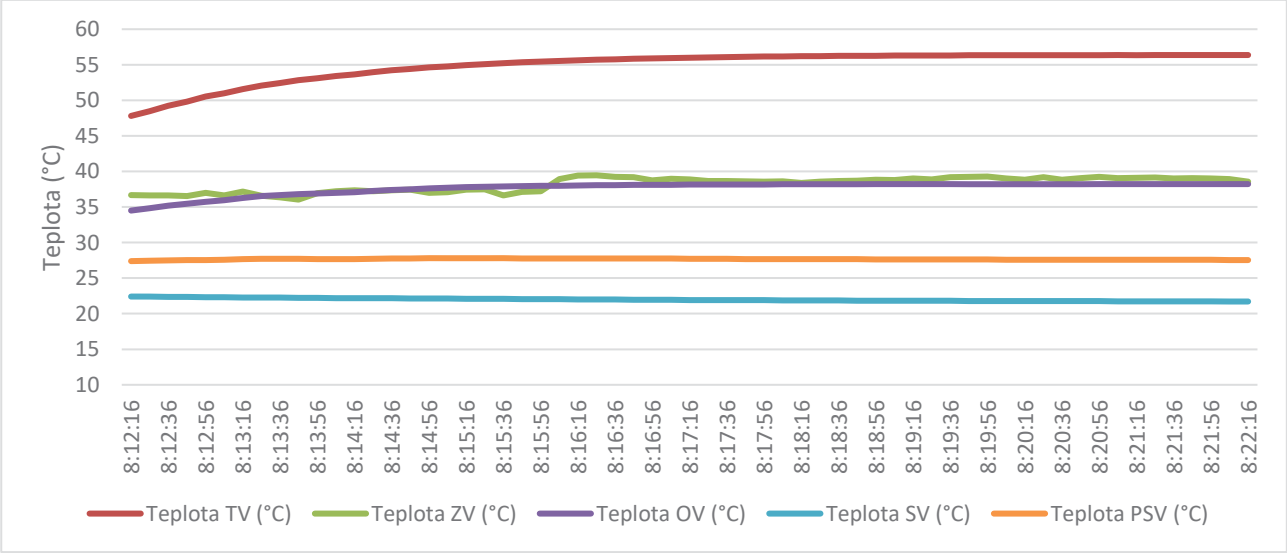
Obrázok 4 Kemper Control Plus

3.1 Experimentálne meranie v letnom období

Počas letných meraní dosahovala teplota vzduchu v laboratóriu 30 °C až 32 °C. Merania boli vykonávané v júli 2025 na výmenníku tepla VT – Zypho, ktorého výrobca deklaruje účinnosť na úrovni 39 % [2]. Teplota vody v sprche bola nastavená na 39 °C. Ukážka priebehu teplôt meraných veličín pre 10 minútové sprchovanie bez rekuperácie je uvedená v Graf. 1 a s rekuperáciou v Graf. 2.



Graf 1 Priebeh teplôt vody 10 min merania bez rekuperácie v letnom období (júl 2025)



Graf 2 Priebeh teplôt vody 10 min merania s rekuperáciou v letnom období (júl 2025)

Merané veličiny boli zaznamenávané prístrojom ALMEMO počas všetkých meraní v 10 sekundových intervaloch. Teplota TV označuje teplú vodu zo zásobníkového ohrievača, teplota ZV predstavuje zmiešanú vodu v termostatickej sprchovej batérii, OV odpadovú vodu vo výmenníku tepla, SV studenú vodu a PSV predohriatu studenú vodu, ktorá po prijatí tepelnej energie prúdi do termostatickej batérie.

Priemerné namerané hodnoty z experimentálnych meraní v letnom období sú uvedené v Tab. 1.

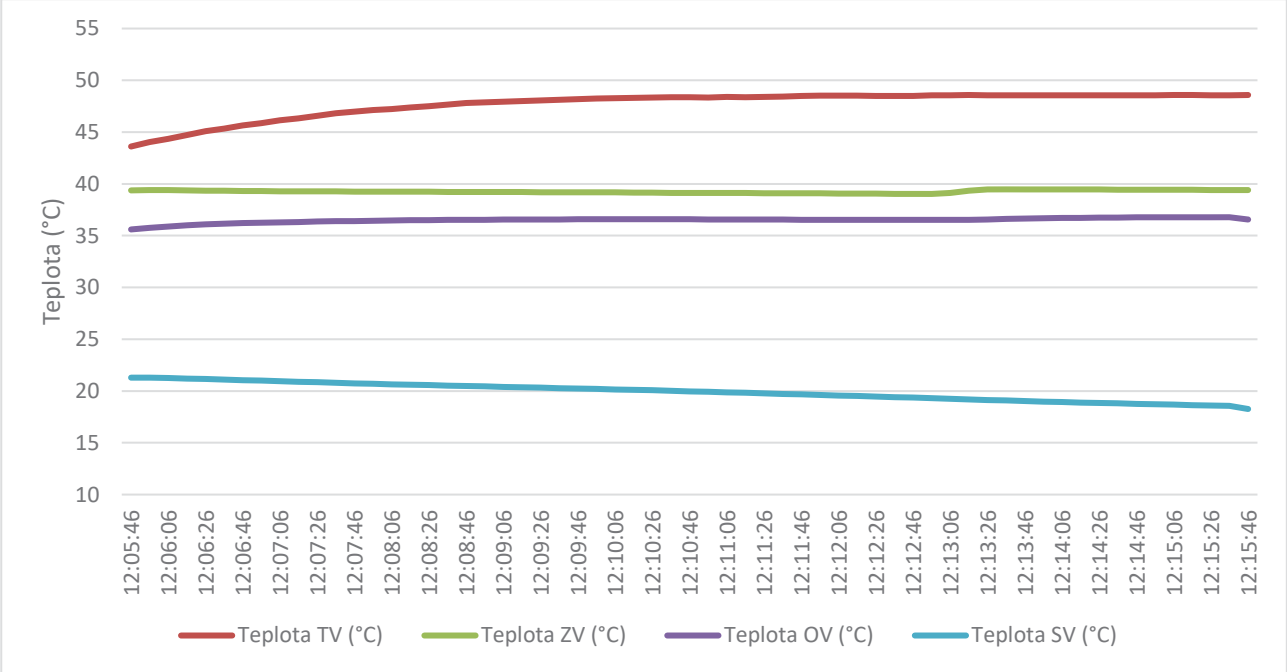
Tab. 1 Priemerné namerané hodnoty z experimentálnych meraní v letnom období

Doba sprchovania bez/s VT	Prietok teplej vody (l/min)	Teplota TV (°C)	Teplota ZV (°C)	Teplota OV (°C)	Teplota SV (°C)	Teplota PSV (°C)
6 min bez VT	2,25	56,09	38,12	36,86	21,41	26,58
6 min bez VT	2,59	51,98	37,15	36,32	21,10	25,92
6 min s VT	1,67	56,40	38,10	36,97	22,23	27,17
6 min s VT	1,69	56,37	38,04	37,00	21,66	26,89
10 min bez VT	2,26	55,29	38,44	37,15	22,33	27,64
10 min bez VT	2,68	51,26	39,39	37,56	22,17	27,49
10 min s VT	1,78	54,90	38,18	37,65	21,98	27,66
10 min s VT	1,83	56,03	39,60	38,09	21,82	28,22

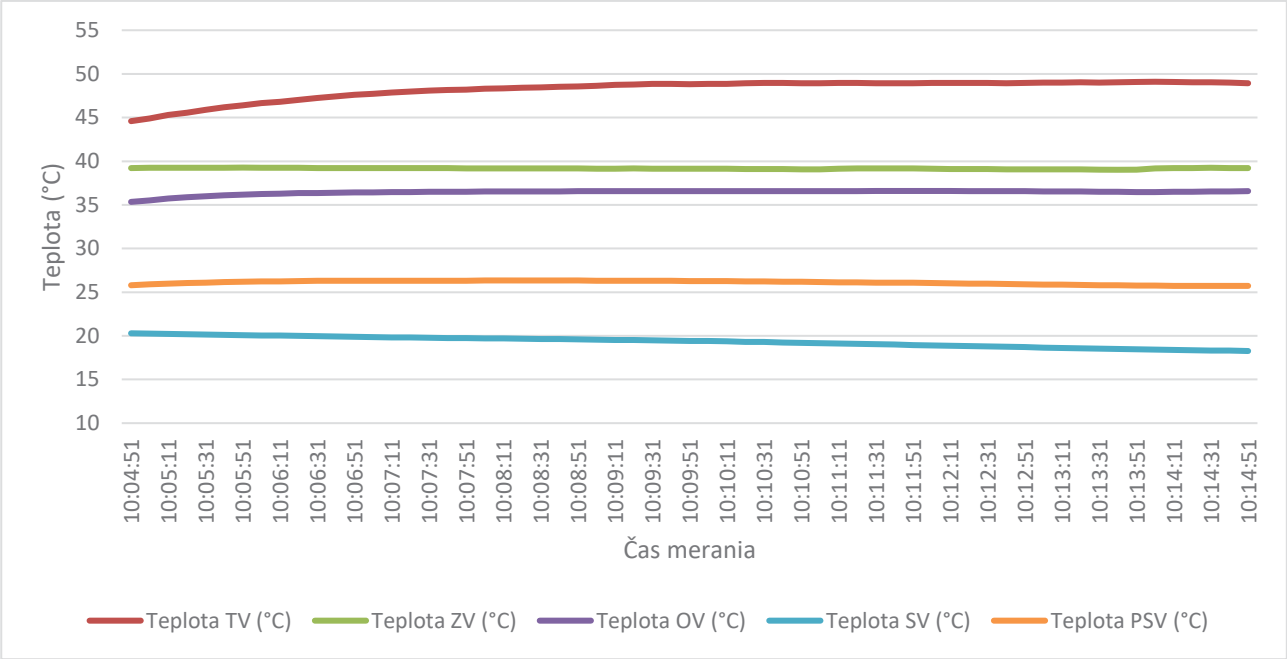
Vzhľadom na to, že potrubia studenej vody nie sú izolované, vysoké teploty vzduchu v laboratóriu značne vplývali aj na teplotu studenej vody v potrubiach. Pri zapnutí meracej zostavy bola teplota studenej vody niekedy až 28 °C, z toho dôvodu bolo vypúšťané veľké množstvo vody z potrubí pred samotným meraním. Merania sa začali až keď teplota studenej vody klesla pod 23 °C.

3.2 Experimentálne meranie v jesennom období

Počas jesenných meraní v októbri 2025 bola teplota vzduchu v laboratóriu 20 °C až 22 °C. Teplota vody v termostatickej sprchovej batérii bola nastavená na 39 °C. Ukážka priebehu teplôt meraných veličín je vykreslená v Graf 3 a v Graf 4.



Graf 3 Priebeh teplôt vody 10 min merania bez rekuperácie v jesennom období (október 2025)



Graf 4 Priebeh teplôt vody 10 min merania s rekuperáciou v jesennom období (október 2025)

Počas jesenného obdobia sa teplota studenej vody pohybovala v rozmedzí 20 – 21 °C, preto nebolo potrebné odpúšťať také veľké množstvo vody z potrubí ako to bolo v prípade letných meraní. Priemerné namerané hodnoty z experimentálnych meraní v jesennom meraní sú v Tab. 2.

Tab. 2 Priemerné namerané hodnoty z experimentálnych meraní v jesennom období

Doba sprchovania bez/s VT	Prietok teplej vody (l/min)	Teplota TV (°C)	Teplota ZV (°C)	Teplota OV (°C)	Teplota SV (°C)	Teplota PSV (°C)
6 min bez VT	2,46	48,24	39,17	36,56	19,15	20,95
6 min bez VT	2,59	49,13	39,13	36,58	18,21	20,58
6 min s VT	2,01	48,91	39,14	36,61	17,87	25,51
6 min s VT	2,07	48,89	39,08	36,53	17,56	25,49
10 min bez VT	2,76	47,70	39,26	36,50	19,92	20,08
10 min bez VT	2,71	48,47	39,38	36,80	18,00	19,92
10 min s VT	1,93	48,23	39,16	36,44	19,33	26,11
10 min s VT	1,99	48,05	39,33	36,74	20,16	26,84

4 Vyhodnotenie experimentálnych meraní

Výrobca výmenníka tepla Zypho deklaruje účinnosť 39 % [2], avšak častokrát výrobca udáva túto hodnotu na základe ideálnych laboratórnych podmienok. V našom laboratóriu nie sú ideálne podmienky pre experimentálne merania, nakoľko potrubia nie sú tepelne izolované a na teplotu takmer všetkých meraných veličín značne vplýva práve teplota okolitého vzduchu. Účinnosť odovzdávania tepla závisí od pomeru rozdielu teplôt, z toho dôvodu bude tepelná účinnosť výmenníka tepla vypočítaná podľa [3]:

$$\eta = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{V_2' \rho_2' c_2' (\theta_2'' - \theta_2')}{V_2' \rho_2' c_2' (\theta_1' - \theta_2')} = \frac{(\theta_2'' - \theta_2')}{(\theta_1' - \theta_2')} \quad (-) \qquad (1)$$

kde:
η – tepelná účinnosť výmenníka tepla (-),
Q – tepelný tok pri prechode tepla (W),
Q_{max} – tepelný tok pri maximálnom prechode tepla (W),
V – objemový prietok vody (m^3/s),
ρ – hustota vody (kg/m^3),
c – špecifická tepelná kapacita tekutiny pri konštantnom tlaku (J/kg.K),
θ – teplota vody (°C),
1 – označenie veličín teplej vody (ochladzovanej),
2 – označenie veličín chladnej vody (ohrievanej),
´ - označenie veličín na vstupe do výmenníka,
´´ - označenie veličín na výstupe z výmenníka [3].

Pre určenie účinnosti odovzdávania tepla je potrebné určiť priemerné namerané hodnoty pre 6 a 10 minútové merania iba s výmenníkom tepla, avšak pre letné aj jesenné obdobie spolu. Priemerné namerané hodnoty pre obe etapy meraní sú uvedené v Tab. 3.

Tab. 3 Priemerné namerané hodnoty z experimentálnych meraní

	Prietok teplej vody (l/min)	**Teplota TV (°C)**	**Teplota ZV (°C)**	**Teplota OV (°C)**	**Teplota SV (°C)**	**Teplota PSV (°C)**
6 min s VT	1,86	52,64	38,59	36,78	19,83	26,27
10 min s VT	1,89	51,80	39,07	37,23	20,82	27,21

Po dosadení priemerných hodnôt zo 6 a 10 minútových meraní s rekuperáciou (Tab.3) do vzorca (1) podľa [3] sa vypočíta účinnosť odovzdávania tepla nasledovne:

$$\eta_6 = \frac{(\theta_2'' - \theta_2')}{(\theta_1' - \theta_2')} = \frac{(26{,}27 - 19{,}83)}{(36{,}78 - 19{,}83)} = 0{,}38 = 38\ \% \qquad (1)$$

$$\eta_{10} = \frac{(\theta_2'' - \theta_2')}{(\theta_1' - \theta_2')} = \frac{(27{,}21 - 20{,}82)}{(37{,}23 - 20{,}82)} = 0{,}39 = 39\ \% \qquad (1)$$

Účinnosť odovzdávania tepla pri 6 minútových sprchovaniach s priemernou teplotou predohriatej studenej vody 26,27 °C, teplotou odpadovej vody 36,78 °C a studenej vody 19,83 °C je 38 %. Pri dobe sprchovania (merania) 10 minút s priemernou teplotou predohriatej studenej vody 27,21 °C, teplotou odpadovej vody 37,23 °C a studenej vody 20,82 °C je účinnosť 39 %.

Účinnosť výmenníka tepla a úspora tepla nie je to isté, pretože teplota odpadovej vody vo výmenníku tepla klesá. Podľa uskutočnených meraní je rozdiel teplôt vody na výtoku v sprche a vo výmenníku tepla 2 až 3 K. Pomerná úspora tepla sa vypočíta v priamej závislosti od účinnosti odovzdávania tepla a teplotných podmienok nasledovne [3]:

$$\Theta_{SZT} = 1 - \frac{(1-\eta)}{\left[1 - \eta \cdot \frac{(\theta_1' - \theta_2')}{(\theta_{TV} - \theta_2')}\right]} \quad (-) \qquad (2)$$

$$\Theta_{SZT\text{-}6} = 1 - \frac{(1-0{,}38)}{[\,1-0{,}38\,.\frac{(36{,}78-19{,}83)}{(52{,}64-19{,}83)}\,]} = 0{,}23 = 23\ \% \quad (2)$$

$$\Theta_{SZT\text{-}10} = 1 - \frac{(1-0{,}39)}{[\,1-0{,}39\,.\frac{(37{,}23-20{,}82)}{(51{,}80-20{,}82)}\,]} = 0{,}23 = 23\ \% \quad (2)$$

Pomerná úspora tepla po dosadení priemerných nameraných hodnôt do vzorca (2) pre 6 a 10 minútové sprchovania vyšla v oboch prípadoch na úrovni 23 %, čiže približne o jednu tretiu menšia ako vypočítaná účinnosť výmenníka tepla.

5 Záver

Experimentálne merania rekuperačného systému odpadovej vody potvrdili, že využitie sprchového výmenníka tepla v podmienkach reálneho laboratórneho prostredia môže prispieť k znižovaniu energetickej náročnosti prípravy teplej vody. Vzhľadom na priemerné hodnoty namerané počas letných a jesenných meraní bola dosiahnutá tepelná účinnosť výmenníka tepla Zypho 38 % pri 6-minútových a 39 % pri 10-minútových sprchovaniach.

Výrobcom deklarovaná účinnosť 39 % bola teda v jednom prípade iba mierne nižšia, aj napriek menej priaznivým podmienkam experimentu, kde teplota jednotlivých veličín bola ovplyvnená najmä teplotou okolitého vzduchu a absenciou tepelnej izolácie potrubí. Po dosadení nameraných údajov do vzťahu pre výpočet pomernej úspory tepla bola stanovená **úspora tepla na úrovni 23 %**, čo predstavuje približne o jednu tretinu nižšiu hodnotu v porovnaní s vypočítanou účinnosťou výmenníka tepla.

Úspora teda priamo závisí od teplotných pomerov studenej a odpadovej vody a jej skutočná hodnota sa môže meniť počas ročných období. Výsledky potvrdzujú, že zaradenie sprchového výmenníka tepla do systému prípravy teplej vody dokáže významne zredukovať potrebu dodatočnej energie z externého zdroja. Na presnejšie kvantifikovanie energetických prínosov v reálnych prevádzkových podmienkach je potrebné realizovať dlhodobejšie merania vrátane merania spotreby teplej vody pri skutočnom sprchovaní, preveriť vplyv rôznych teplotných a prietokových režimov a uvažovať aj s aplikáciou dodatočnej tepelnej izolácie potrubí.

Experimentálne meranie účinnosti odovzdávania tepla v rekuperačnom sprchovom výmenníku Zypho s nameranou účinnosťou 39 % potvrdilo uvádzanú účinnosť od výrobcu. Úspora tepla pri sprchovaní predstavuje hodnotu 23 %. Pri využití viacerých rekuperačných výmenníkov v hygienicky zariadeniach, napr. hromadných sprchách je možne dosiahnuť aj významné úspory tepla.

6 Literatúra

[1] STN 1717: 2002, Ochrana pitnej vody. Ochrana pitnej vody pred znečistením vo vnútornom vodovode a všeobecné požiadavky na zabezpečovacie zariadenia.

[2] Technický list výmenníka tepla Zypho
Dostupné na: https://zypho.uk/zypho-products/

[3] FERSTL, K., MASARYK, M.: Prenos tepla. Bratislava: Slovenské technická univerzita v Bratislave, 2011. 424s. ISBN 978-80-227-3534-6.

Poďakovanie

Príspevok bol podporovaný Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR prostredníctvom grantov VEGA 1/0118/23 a VEGA 1/0482/25.

Branislav Kožák[1]
Teória a technika prostredia budov, 2. ročník

EFEKTÍVNOSŤ SYSTÉMOV REKUPERÁCIE ODPADOVÉHO TEPLA

EFFICIENCY OF SYSTEMS FOR UTILIZING WASTE HEAT FROM SEWER SYSTEMS

Abstract

Wastewater heat recovery represents a promising method of utilizing low-grade energy in urban environments. The aim of this literature review was to analyze recent scientific findings in the field of thermal energy recovery from municipal wastewater, focusing on technical solutions, environmental considerations, and implementation planning. Based on five selected studies, key factors influencing recovery efficiency were identified, including flow and temperature variability, sewer system type, distance from wastewater treatment plants, and the presence of lateral inflows. The review also examined the impact on biological processes in treatment plants, particularly the risk of temperature drops below critical thresholds for nitrification. The findings highlight that effective heat recovery requires accurate modeling of thermal profiles, adherence to environmental constraints, and integration into broader energy and urban planning strategies. Successful implementation depends on multidisciplinary approaches and collaboration among technical, environmental, and planning professionals.

Kľúčové slová
rekuperácia tepla; odpadová voda; energetická účinnosť; tepelné čerpadlá; výmenník tepla; obnoviteľné zdroje energie; kanalizácia

1. Úvod

Súčasné výzvy v oblasti energetiky, spojené s potrebou znižovania emisií skleníkových plynov a prechodu na nízkouhlíkovú ekonomiku, kladú vysoké nároky na zvyšovanie energetickej efektívnosti, najmä v sektore vykurovania a chladenia. Popri využívaní konvenčných obnoviteľných zdrojov energie sa čoraz väčšia pozornosť sústreďuje na využitie sekundárnych zdrojov tepla, ktoré sú často prehliadané, hoci disponujú významným energetickým potenciálom. Jedným z najstabilnejších a celoročne dostupných sekundárnych zdrojov je odpadové teplo obsiahnuté v odpadovej vode v kanalizačných sieťach.

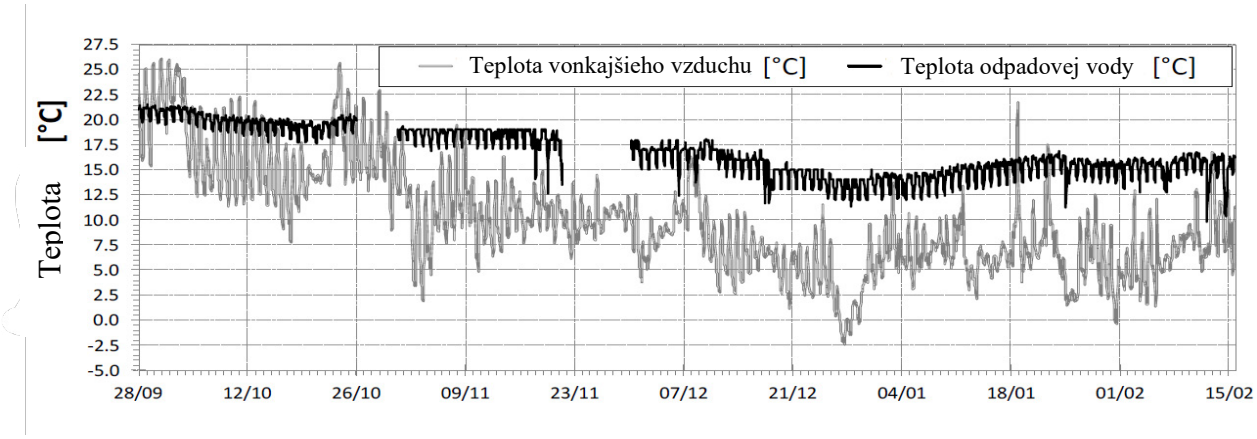
Odpadová voda si totiž udržiava relatívne stabilnú a vyššiu teplotu než okolie, čo z nej robí ideálny, i keď nízkopotenciálny, zdroj tepelnej energie. Pre efektívne využitie tohto nízkoteplotného zdroja je kľúčová jeho kombinácia s technológiami schopnými zvyšovať teplotný spád na úroveň potrebnú pre vykurovacie systémy. Najefektívnejšou metódou je integrácia rekuperačných systémov s tepelnými čerpadlami, ktoré dokážu s vysokou účinnosťou premeniť získané teplo na využiteľnú energiu. Táto synergia prináša významné úspory primárnej energie, avšak celková efektívnosť riešenia je vysoko závislá od technického prevedenia výmenníka, jeho umiestnenia v sieti a prevádzkových podmienok tepelných čerpadiel.

[1]Branislav, Kožák, Ing. Stavebná fakulta STU Bratislava, Katedra TZB, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Hoci sa technológia rekuperácie tepla z kanalizácie skúma už dlhšie, publikované výsledky sú často rozptýlené, zamerané na špecifické pilotné projekty a vykazujú značné rozdiely vo výkonnosti. Chýba preto komplexný a kritický prehľad zhodnocujúci rôzne technické riešenia a ich dopad na kľúčové výkonnostné ukazovatele, ako je napríklad koeficient výkonnosti COP[1] tepelných čerpadiel v reálnej prevádzke.

2. Potenciál rekuperácie tepla z odpadových vôd v mestských kanalizačných systémoch

Odpadové vody z domácností predstavujú významný zdroj nízkopotenciálnej tepelnej energie, ktorá je v súčasnosti vo veľkej miere nevyužitá. Vzhľadom na to, že približne 60 % spotrebovanej vody v domácnostiach je ohrievaných (napr. pri sprchovaní, praní či umývaní riadu), dochádza k značným stratám tepla, ktoré sú odvádzané do kanalizačného systému. Toto odpadové teplo je možné efektívne využiť prostredníctvom výmenníkov tepla a tepelných čerpadiel, čím sa otvára priestor pre jeho opätovné využitie na vykurovanie alebo chladenie budov [1].
Analýzy ukazujú, že teplota odpadových vôd v kanalizačných systémoch sa počas roka pohybuje v rozmedzí 10–20 °C, pričom v zimných mesiacoch, ako je možné vidieť na obrázku č. 1, je stabilne vyššia ako teplota okolitého vzduchu. Denné výkyvy teploty sú relatívne malé (2–3 °C), zatiaľ čo prietoky vykazujú výrazné denné cykly, ktoré korelujú s aktivitou obyvateľstva. Tieto poznatky sú kľúčové pre návrh a dimenzovanie rekuperačných systémov, keďže účinnosť výmeny tepla závisí od teplotného rozdielu a prietoku odpadovej vody [1] [6].



Obrázok 1 Priebeh teplôt vonkajšieho vzduchu a odpadovej vody [1]

Pri návrhu systémov rekuperácie tepla je potrebné zohľadniť nielen fyzikálne parametre (prietok, teplotu, geometriu potrubia), ale aj prevádzkové faktory ako tvorbu biofilmu na výmenníkoch, ktorá znižuje ich účinnosť. Výpočtové modely ukazujú, že aj pri relatívne malých prietokoch (napr. 2 l/s) je možné získať desiatky kilowattov tepelného výkonu, čo môže byť dostatočné na pokrytie potrieb menších objektov alebo častí budov. Z hľadiska plánovania na úrovni mesta je dôležité poznať nielen absolútny potenciál, ale aj jeho priestorové rozloženie. V tejto súvislosti bola vyvinutá metodika, ktorá umožňuje modelovať kanalizačnú sieť na základe otvorených dát a následne odhadnúť teoretický potenciál odpadového tepla v jednotlivých častiach mesta.

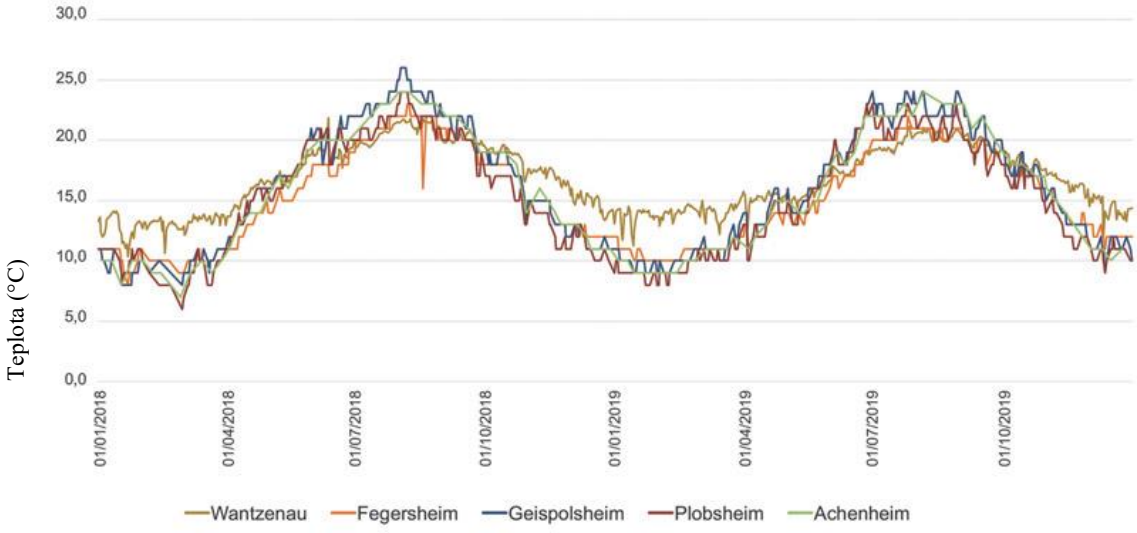
[1] Výkonové číslo COP je kľúčové meradlo efektívnosti prevádzky tepelných čerpadiel. Vypočítava sa ako pomer okamžite vyrobenej tepelnej energie k elektrickej energii spotrebovanej na pohon čerpadla [1]

Model využíva simuláciu prúdenia odpadovej vody a umožňuje identifikovať najvhodnejšie miesta pre inštaláciu rekuperačných zariadení [1] [2].
Výsledky aplikácie tejto metodiky na vybrané európske mestá (napr. Graz, Göttingen, Mannheim) ukázali, že najvyšší potenciál sa nachádza v oblastiach s priemernou až vysokou hustotou obyvateľstva, kde je zároveň dostupná infraštruktúra diaľkového vykurovania. Model tiež umožňuje zohľadniť sezónne a denné výkyvy, ako aj vplyv bočných prítokov, ktoré môžu významne ovplyvniť teplotný profil v kanalizácii. Z uvedeného vyplýva, že mestské kanalizačné siete predstavujú stabilný a predvídateľný zdroj nízkopotenciálneho tepla, ktorý je možné efektívne využiť najmä v kombinácii s tepelnými čerpadlami. Pre úspešnú implementáciu je však nevyhnutné detailné poznanie lokálnych podmienok a využitie pokročilých modelovacích nástrojov [2].

3. Vplyv rekuperácie tepla na činnosť čistiarní odpadových vôd

Pri návrhu a implementácii systémov rekuperácie tepla z odpadových vôd je nevyhnutné zohľadniť ich potenciálny vplyv na činnosť čistiarní odpadových vôd (ČOV). Teplota odpadovej vody zohráva kľúčovú úlohu v biologických procesoch, najmä v nitrifikácia[2] a denitrifikácia[3]. Pokles teploty pod určitú hranicu môže viesť k zníženiu účinnosti týchto procesov, čo môže mať za následok zhoršenie kvality vyčistenej vody a potrebu technických zásahov do prevádzky ČOV.

Z literatúry vyplýva, že bežne používaná hodnota teplotného rozdielu $\Delta T = 4{,}5$ K pri výpočtoch potenciálu rekuperácie nemusí byť vždy vhodná. V niektorých prípadoch môže takýto odber tepla spôsobiť pokles teploty na vstupe do ČOV o viac ako 1 °C, čo je hranica, pri ktorej už môže dôjsť k narušeniu biologických procesov, najmä ak ČOV pracuje blízko svojej maximálnej kapacity alebo ak teplota klesne pod návrhovú hodnotu (napr. 12 °C) [3].



Obrázok 2 Priemerná denná teplota odpadových vôd (°C) na vstupe do čistiarní odpadových vôd Eurometropoly Štrasburg (EMS) – La Wantzenau, Fegersheim, Geispolsheim, Plobsheim a Achenheim (roky 2018–2019) [3]

[2] Nitrifikácia je aeróbny (vyžadujúci kyslík) biologický proces, pri ktorom sa toxické amónne zlúčeniny v podobe amoniaku a amónnych iónov prítomné v odpadovej vode (napr. z moču), premieňajú na menej škodlivé dusičnany
[3] Denitrifikácia je anoxický (nevyžadujúci kyslík) biologický proces, ktorý nasleduje po nitrifikácii a je kľúčový pre úplné odstránenie dusíka z vody.

Na základe týchto poznatkov bola navrhnutá metodika, ktorá umožňuje stanoviť maximálne prípustné množstvo odoberateľného tepla z kanalizačnej siete bez ohrozenia činnosti ČOV. Táto metodika zohľadňuje nielen prietoky a teploty v jednotlivých bodoch siete, ale aj ich vplyv na výslednú teplotu na vstupe do ČOV. Výsledkom je tzv. korigovaná energetická mapa kanalizačnej siete, ktorá poskytuje realistickejší obraz o využiteľnom tepelnom potenciáli [3].

Na presnejšie hodnotenie vplyvu rekuperácie tepla na teplotu odpadovej vody bol vyvinutý matematický model, ktorý simuluje teplotné profily v kanalizačných potrubiach. Model zohľadňuje výmenu tepla medzi odpadovou vodou, stenou potrubia, vzduchom v kanalizácii a okolím. Výsledky simulácií ukazujú, že najvýznamnejším mechanizmom prenosu tepla je výmena medzi vodou a stenou potrubia, pričom dôležitú úlohu zohráva aj akumulácia tepla v materiáli potrubia. V dynamických podmienkach môže dôjsť k dočasnému poklesu teploty vody, ktorý sa však v priebehu niekoľkých kilometrov kanalizácie čiastočne kompenzuje spätným prenosom tepla z potrubia [4].

Z hľadiska prevádzky ČOV je dôležité, aby teplota na vstupe neklesla pod kritickú hranicu. V prípade, že dôjde k poklesu o 1 °C, môže byť potrebné predĺžiť dobu zdržania v aeróbnych nádržiach o 10 %, alebo zväčšiť ich objem. Tieto opatrenia však predstavujú dodatočné investičné a prevádzkové náklady. Preto je vhodné navrhovať rekuperačné systémy tak, aby sa minimalizoval ich vplyv na teplotu vody na vstupe do ČOV, napríklad adaptívnym riadením odberu tepla alebo výberom vhodných lokalít s dostatočnou vzdialenosťou od ČOV [3][4][25][27].

Z uvedeného vyplýva, že environmentálne aspekty rekuperácie tepla nemožno podceňovať. Ich zohľadnenie je nevyhnutné pre udržateľnú a bezpečnú prevádzku kanalizačných a čistiacich systémov. Vhodne zvolená metodika a modelovanie umožňujú optimalizovať návrh systémov tak, aby sa dosiahla rovnováha medzi energetickým ziskom a ochranou biologických procesov v ČOV.

4. Plánovanie a metodiky hodnotenia vhodnosti lokalít pre rekuperáciu tepla

Efektívne využitie tepelného potenciálu odpadových vôd si vyžaduje nielen technické riešenia, ale aj systematický prístup k plánovaniu a hodnoteniu vhodnosti lokalít. V tejto súvislosti sa v literatúre objavujú metodiky, ktoré integrujú energetické, environmentálne a urbanistické aspekty do jedného rámca. Cieľom týchto prístupov je identifikovať miesta s dostatočným potenciálom pre rekuperáciu tepla, ktoré zároveň neohrozujú činnosť čistiarní odpadových vôd a sú technicky a ekonomicky realizovateľné.

Jedna z takýchto metodík bola navrhnutá pre hodnotenie lokalít v kanalizačných systémoch, pričom zohľadňuje dva hlavné aspekty: dostupnosť tepelného potenciálu a vplyv na teplotu na vstupe do ČOV.

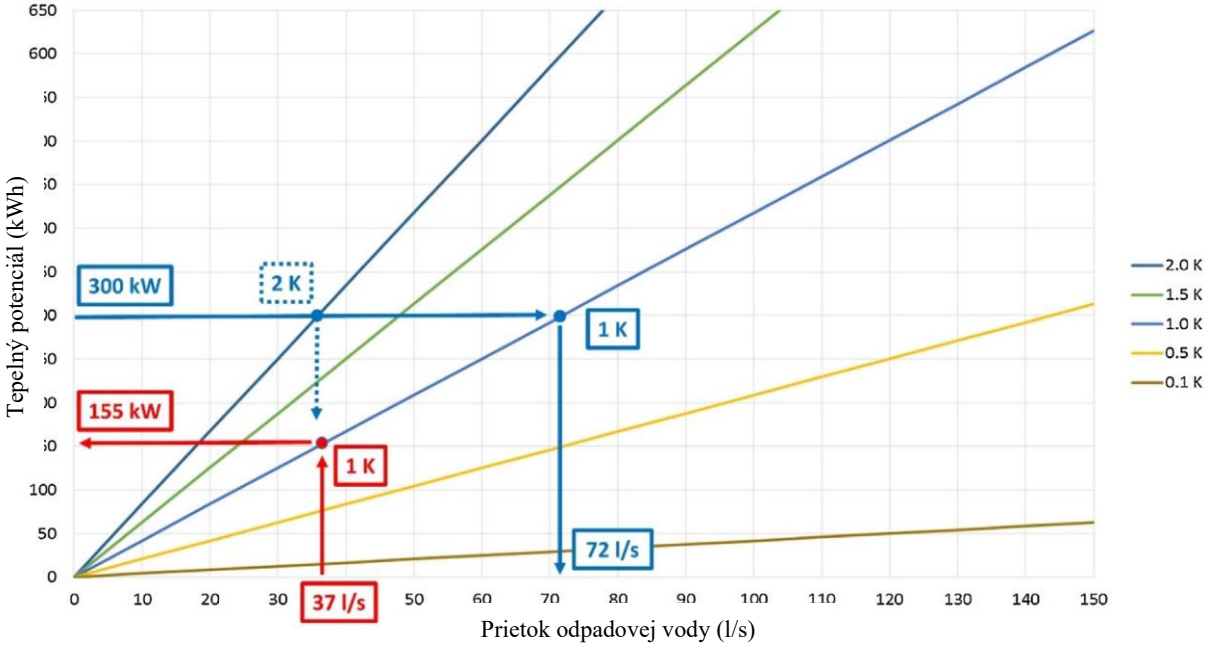
Postup pozostáva zo štyroch krokov:

1. predbežný výber lokality,
2. spracovanie údajov o prietoku a teplote,
3. výpočet potenciálu a odhadu vplyvu na ČOV,
4. finálny návrh

Pre predbežný výber boli definované kritériá ako minimálny prietok (15 l/s), blízkosť k bočným prítokom, poloha v zastavaných oblastiach a krátka vzdialenosť k odberateľom tepla [5].

Na výpočet dostupného tepelného výkonu sa používa jednoduchý energetický model založený na prietoku, mernom teple vody a rozdiele teplôt. Vplyv na ČOV sa odhaduje pomocou modelu

miešania, ktorý zohľadňuje podiel prietoku a teplotu vody pred a po rekuperácii. Hoci ide o zjednodušený prístup, poskytuje dostatočne presné výsledky pre predbežné plánovanie [24] [25].



Obrázok 3. Vzťah medzi prietokom odpadovej vody a dostupným tepelným potenciálom [5]

Metodika bola overená na prípadovej štúdii v Rakúsku, kde bola analyzovaná kanalizačná sieť s dĺžkou 24 km a pripojením približne 32 000 ekvivalentných obyvateľov. V rámci meraní sa počas piatich mesiacov zaznamenávali údaje o prietoku a teplote v 10 bodoch siete. Výsledky ukázali, že teplota odpadových vôd má stabilný priebeh a že bočné prítoky môžu významne ovplyvniť teplotný profil. V oblastiach s krátkym časom zdržania a vysokým podielom čerstvých prítokov bola teplota vyššia, čo zvyšuje potenciál rekuperácie [5].

Na podporu rozhodovania boli definované štyri plánovacie princípy:

1. Čím väčší je rozdiel medzi výslednou teplotou a legislatívne stanovenou minimálnou teplotou na vstupe do ČOV, tým menšie je riziko negatívneho vplyvu.
2. Prítomnosť bočných prítokov medzi miestom rekuperácie a ČOV môže prispieť k dohrevu odpadovej vody.
3. Ak je teplota na mieste rekuperácie výrazne vyššia ako na vstupe do ČOV, prirodzené ochladzovanie môže čiastočne kompenzovať odber tepla.
4. Dlhšia vzdialenosť medzi miestom rekuperácie a ČOV podporuje stabilizáciu teploty na konštantnej úrovni.

Tieto princípy umožňujú lepšie pochopiť správanie sa teploty v kanalizačnej sieti a prispievajú k informovanému rozhodovaniu pri plánovaní rekuperačných systémov. Metodika je praktická, jednoducho aplikovateľná a vhodná pre predbežné hodnotenie, pričom môže byť doplnená o podrobnejšie modelovanie v pokročilých fázach projektovania [4] [5] [20] [21].

5. Záver a zhodnotenie poznatkov

Na základe doterajších informácii možno konštatovať, že rekuperácia tepla z odpadových vôd predstavuje perspektívne riešenie pre zvyšovanie energetickej efektívnosti budov a mestských infraštruktúr. Všetky analyzované štúdie potvrdzujú, že odpadová voda obsahuje významné množstvo nízkopotenciálnej tepelnej energie, ktorá je v súčasnosti vo veľkej miere nevyužitá [1] [2] [3] [4].

Z pohľadu technického riešenia je kľúčové detailné poznanie prietokových a teplotných pomerov v kanalizačnej sieti. Stabilita teploty odpadových vôd počas dňa a jej relatívne vysoké hodnoty aj v zimných mesiacoch vytvárajú vhodné podmienky pre efektívnu rekuperáciu. Zároveň sa ukazuje, že aj pri menších prietokoch je možné získať významné množstvo tepelnej energie, čo umožňuje aplikáciu technológie aj v menších objektoch alebo decentralizovaných systémoch [17] [18] [19].

Environmentálne aspekty, najmä vplyv na činnosť čistiarní odpadových vôd, si vyžadujú osobitnú pozornosť. Pokles teploty na vstupe do ČOV môže negatívne ovplyvniť biologické procesy, čo si vyžaduje obmedzenie množstva odoberaného tepla alebo implementáciu kompenzačných opatrení. V tejto súvislosti sa ako nevyhnutné ukazuje využitie modelovacích nástrojov, ktoré umožňujú simulovať teplotné profily v kanalizačnej sieti a optimalizovať návrh rekuperačných systémov.

Z hľadiska plánovania je dôležité integrovať rekuperáciu tepla do širších energetických a urbanistických stratégií. Praktické metodiky, ktoré kombinujú technické, environmentálne a ekonomické kritériá, umožňujú identifikovať vhodné lokality a podporujú rozhodovanie v raných fázach projektovania. Zároveň sa ukazuje potreba multidisciplinárneho prístupu, ktorý zahŕňa spoluprácu medzi odborníkmi z oblasti vodného hospodárstva, energetiky, urbanizmu a verejnej správy.

Celkovo možno rekuperáciu tepla z odpadových vôd považovať za technológiu s vysokým potenciálom, ktorá môže významne prispieť k znižovaniu spotreby primárnych energetických zdrojov a emisií skleníkových plynov. Jej širšia implementácia si však vyžaduje systematický prístup, podporený kvalitnými dátami, modelovaním a legislatívnym rámcom.

Poďakovanie

Táto práca bola podporovaná Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky prostredníctvom grantu VEGA 1/0118/23.

Literatúra

[1] Cipolla, S. S., & Maglionico, M. (2014). Heat recovery from urban wastewater: analysis of the variability of flow rate and temperature in the sewer of Bologna, Italy. *Energy Procedia*, 45, 288–297.

[2] Pelda, J., & Holler, S. (2019). Spatial distribution of the theoretical potential of waste heat from sewage: A statistical approach. *Energy*, 180, 751–762.

[3] Cordova Llanos, V., Humbel, X., Boisson, J., Pichard, T., Philippe, R., & Pomies, M. (2022). Analyse du potentiel de récupération de chaleur des eaux usées prenant en compte l'impact sur la STEU. *Techniques Sciences Méthodes*, 117(3), 63–71.

[4] Dürrenmatt, D. J., & Wanner, O. (2014). A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers. *Water Research*, 48, 548–558.

[5] Kretschmer, F., Simperler, L., & Ertl, T. (2016). Analysing wastewater temperature development in a sewer system as a basis for the evaluation of wastewater heat recovery potentials. *Energy and Buildings*, 128, 639–648.

[6] Schmid F. Sewage water: interesting heat source for heat pumps and chillers, Energy-engineer FH, Swiss Energy Agency for Infrastructure Plants. Zürich, Switzerland, 2009.

[7] Meggers, F., Hansjurg, L. The potential of wastewater heat and exergy: Decentralized high-temperature recovery with a heat pump. Energy and Buildings 2010, 43(4), pp. 879-886.

[8] Deiss Ch., Energiequelle zum Heizen und Kühlen-Grösste Abwasserener gienutzungsanlage in der Schweiz. Gwa journal no 6/2007, pp. 413-420. (in German).

[9] Shen, C., Jiang, Y., Yao, Y., & Wang, X. An experimental comparison of two heat exchangers used in wastewater source heat pump: A novel dry-expansion shell-and-tube evaporator versus a conventional immersed evaporator. Energy 2012, 47(1), pp. 600-608.

[10] Cipolla, S. S., & Maglionico, M. (2014). Heat recovery from urban wastewater: analysis of the variability of flow rate and temperature in the sewer of Bologna, Italy. *Energy Procedia*, 45, 288–297.

[12] Cordova Llanos, V., Humbel, X., Boisson, J., Pichard, T., Philippe, R., & Pomies, M. (2022). Analyse du potentiel de récupération de chaleur des eaux usées prenant en compte l'impact sur la STEU. *Techniques Sciences Méthodes*, 117(3), 63–71.

[13] Pelda, J., & Holler, S. (2019). Spatial distribution of the theoretical potential of waste heat from sewage: A statistical approach. Energy, 180, 751–762.

[14] Colmenar-Santos A, Borge-Díez D, Rosales-Asensio E. District heating and cooling networks in the European Union. Cham: Springer International Publishing; 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57952-8.

[15] European Commission. Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions: An EU Strategy on Heating and Cooling, COM, vol. 51. Brussels: European Comission; 2016. p. 2016. final.

[16] Christidis A, Mollenhauer E, Tsatsaronis G, Schuchardt GK, Holler S, Bottger D, Brückner TC. In: EnEff:Warme - Einsatz von Warmespeichern und Power-to- Heat-Anlagen in der Fernwarmeerzeugung, vol. 44; 2017. https://doi.org/10.2314/GBV:1023701839. of Forschung und Entwicklung/AGFW, AGFW, Frankfurt am Main, August, https://doi.org/10.2314/GBV:1023701839.

[17] Rama M, Wahlroos M. Introduction of new decentralised renewable heatsupply in an existing district heating system. Energy 2018;154:68e79. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.105.
[18] Lund H, Duic N, Østergaard PA, Mathiesen BV. Smart energy systems and 4th generation district heating. Energy 2016;110:1e4. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.105.
[19] Averfalk H, Werner S. In: kyung Won K, Ulseth R, editors. Essential improvements in future district heating systems. Book of Abstracts; 2016.
[20] Lund H, Werner S, Wiltshire R, Svendsen S, Thorsen JE, Hvelplund F, Mathiesen BV. 4th generation district heating (4gdh). Energy 2014;68:1e11. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089.
[21] Ziemele J, Cilinskis E, Blumberga D. Pathway and restriction in district heating systems development towards 4th generation district heating. Energy 2018;152:108e18. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.122.
[22] Connolly D, Lund H, Mathiesen BV, Werner S, M€oller B, Persson U, Boermans T, Trier D, Østergaard PA, Nielsen S. Heat roadmap europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the eu energy system. Energy Policy 2014;65:475e89. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.035.
[23] eurostat. Use of water by the domestic sector. 2016.
[24] Pardo N, Vatopoulos K, Krook-Riekkola A, Moya JA, Perez A. In: Heat and cooling demand and market perspective. vol. 25381. Luxembourg: Publica
[25] Dürrenmatt, D. J., & Wanner, O. (2014). A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers. *Water Research*, 48, 548–558.
[26] Kretschmer, F., Simperler, L., & Ertl, T. (2016). Analysing wastewater temperature development in a sewer system as a basis for the evaluation of wastewater heat recovery potentials. *Energy and Buildings*, 128, 639–648.
[27] DWA, 2009. Merkblatt DWA-M114. Energie aus Abwasser—Wärme-undLageenergie (Energy from Wastewater—Thermal and Potential Energy).Hennef.

Lukáš Michalák[1]
Teória a technika prostredia budov, 2. ročník

KVANTIFIKÁCIA ENERGETICKÝCH ÚSPOR PRI POUŽITÍ DOPYTOVO RIADENÉHO VETRANIA V PODZEMNÝCH GARÁŽACH V KONTEXTE PLATNEJ SLOVENSKEJ TECHNICKEJ NORMY

QUANTIFYING ENERGY SAVINGS OF DEMAND-CONTROLLED VENTILATION IN UNDERGROUND GARAGES WITHIN THE FRAMEWORK OF THE CURRENT SLOVAK TECHNICAL STANDARD

Abstract
Current Slovak technical standards for the design of ventilation systems in underground garages, particularly the STN 73 6058 standard, do not reflect the current state of the art, health protection requirements, and especially the principles of energy efficiency. This paper presents a critical comparative analysis of the current Slovak standard with international standards and guidelines (ČSN, VDI, WHO …), identifying key deficiencies in its design methodology and permissible pollutant limits. The main part of the paper proposes a research methodology in the form of a case study conducted in a modern garage equipped with a demand-controlled ventilation (DCV) system. The objective is to measure the actual energy consumption of this system and compare it to the hypothetical consumption of a system designed according to the outdated STN standard. It is expected that the results will demonstrate the significantly lower energy demand of modern systems and provide a strong, data-driven argument for the necessary revision of the Slovak standard.

Kľúčové slová / Key Words
vetranie garáží; kvalita vnútorného vzduchu; oxid uhoľnatý; energetická efektívnosť

1. Úvod

Podzemné garáže predstavujú nevyhnutnú súčasť modernej mestskej infraštruktúry. Ich vetracie systémy musia plniť dve zásadné funkcie – zabezpečenie kvality vnútorného vzduchu počas bežnej prevádzky a odvod dymu a tepla v prípade požiaru [1].

Z prevádzkového hľadiska je kľúčovým cieľom odstraňovanie škodlivých kontaminantov. Oxid uhoľnatý (CO) je dlhodobo považovaný za primárnu kontaminujúcu látku kvôli jeho dobre zdokumentovaným zdravotným rizikám. Okrem CO je nutné riediť aj iné škodliviny, ako sú oxidy dusíka (NO_x), benzén (C_6H_6) či prchavé organické zlúčeniny (VOC) [2, 3, 4].

Norma STN 73 6058, ktorá v Slovenskej republike určuje základné zásady pre návrh garáží, pochádza z roku 1987. Norma prešla drobnými revíziami v rokoch 1988 a1989, odvtedy sa však výrazne zmenila emisná charakteristika vozidiel, technológie riadenia vetrania a aj požiadavky na energetickú efektívnosť.

Zmenšujúce sa emisné charakteristiky vozidiel a potreba znížiť vysoké prevádzkové náklady viedli k prechodu na dopytovo riadené vetranie DCV (Demand-controlled ventilation). Moderné DCV systémy využívajú senzory oxidu uhoľnatého na monitorovanie kvality vzduchu a na základe

[1] Lukáš Michalák, Ing., Stavebná fakulta STU, Katedra TZB, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

skutočnej koncentrácie modulujú rýchlosť ventilátorov. Tento prístup umožňuje plynulú reguláciu a dosiahnutie výrazných úspor energie [5].

2. Porovnanie slovenskej normy s medzinárodnými štandardami

Porovnanie slovenskej normy s jej českým, nemeckým či britským ekvivalentom, ako aj s odporúčaniami medzinárodných organizácií, odhaľuje významné rozdiely v troch kľúčových oblastiach.

2.1 Ochrana zdravia a prípustné limity CO

Norma STN 73 6058 stanovuje maximálnu prípustnú koncentráciu oxidu uhoľnatého 87 ppm počas 30-minútovej expozície. Táto hodnota je približne o 75 % vyššia ako odporúčanie Svetovej zdravotníckej organizácie (WHO), ktorá pre rovnaký časový interval definuje limit 50 ppm, pričom pre 8-hodinovú expozíciu stanovuje len 10 ppm [6, 7]. Takto benevolentný limit znamená, že pri návrhu podľa STN môže nastať situácia, kedy je ochrana zdravia nedostatočná.

Ďalším zásadným nedostatkom STN 73 6058 je, že explicitne neodkazuje na žiadne slovenské ani európske právne predpisy týkajúce sa ochrany zdravia pri práci. Naopak, nemecký predpis VDI 2053 a česká norma ČSN 73 6058 tieto odkazy obsahujú a rozlišujú medzi priestormi určenými pre krátkodobý pobyt vodičov a priestormi s dlhodobým pobytom zamestnancov [8, 9].

VDI 2053 navyše zdôrazňuje potrebu posúdenia vplyvu emisií na okolie – umiestnenie výfukových otvorov mimo obytných okien, balkónov a detských ihrísk. Takéto ustanovenie v slovenskej norme úplne chýba, hoci ide o zásadný aspekt ochrany verejného zdravia [8, 9].

V tabuľke 1 sú prezentované prípustné koncentrácie CO pre rôzne expozičné doby v zmysle analyzovaných noriem.

Tabuľka 1: Prípustné limity CO pre rozličné doby expozície naprieč viacerými analyzovanými publikáciami [autor]

Publikácia	CO limit pre 15 minút	CO limit pre 30 minút	CO limit pre 1 hodinu	CO limit pre 8 hodín
WHO Guidelines (2021)	90	50	30	10
ASHRAE Handbook (2019)	-	-	35	25
STN 73 6058 (1987)	-	87	-	20
ČSN 73 6058 (2011)	-	50	-	26
VDI 2053 (2014)	60	-	-	20
BS 7346-7	90	-	-	30

Priame porovnanie týchto hodnôt je náročné, keďže každá norma definuje svoje limity CO odlišným spôsobom. Z porovnania je však zrejmé, že okrem normy STN žiadny z analyzovaných štandardov neprekračuje krátkodobé limity CO odporúčané Svetovou zdravotníckou organizáciou. Na druhej strane, väčšina noriem prijíma 8-hodinové expozičné limity vychádzajúce zo smerníc EÚ, ktoré sú pre túto dĺžku expozície spravidla vyššie než odporúčania WHO.

2.2 Metodika určenia prietokov vzduchu

Pokiaľ ide o určenie potrebných prietokov vzduchu, väčšina preskúmaných noriem poskytuje samostatné metodiky pre prirodzené a nútené vetranie. Keďže sa tento príspevok zameriava na podzemné garáže, kde STN a ČSN odporúčajú nútené vetranie, nasledujúca analýza sa sústreďuje na metodiky núteného vetrania. Spomedzi skúmaných dokumentov je usmernenie britskej normy (BS) pre prevádzkové vetranie najmenej podrobné a ponúka základné odporúčanie šiestich výmen vzduchu za hodinu. Zjednodušený prístup možno vidieť aj v norme STN, ktorá poskytuje paušálne hodnoty 900 m^3/h na jedno parkovacie miesto pre zariadenia so špičkovou premávkou a 300 m^3/h pre tie bez nej. Norma VDI predstavuje alternatívnu zjednodušenú metódu – odvodenú z predpisov spolkových krajín – ktorá používa prietok vztiahnutý na plochu o hodnote 6 $m^3/(h.m^2)$ [6, 8, 10].

Pre prípady, keď sú známe skutočné prevádzkové podmienky, ponúkajú normy STN, ČSN a VDI podrobnejšie výpočtové metódy. Tieto postupy však vykazujú podstatné rozdiely. Najmenšiu mieru špecifikácie poskytuje norma STN, ktorá predpokladá jedinú hodnotu emisie CO 0,5 m^3/h na vozidlo, bez diferenciácie medzi voľnobehom a pohybom vozidla, či emisiami studeného a zohriateho motora. Daná hodnota pochádza z doby vzniku normy a je násobne vyššia ako emisie vozidiel spĺňajúcich aktuálnu normu Euro 6. Norma STN rovnako nerozlišuje medzi vozidlami s dieselovým a benzínovým pohonom. V kontraste s tým, normy ČSN a VDI berú do úvahy jazdné vzdialenosti, pričom VDI implementuje aj korekčné faktory pre zosúladenie teoretických výpočtov s reálnymi podmienkami [6, 8, 9].

2.3 Energetická efektívnosť

Energetická efektívnosť je oblasť, v ktorej sa zastaranosť STN 73 6058 prejavuje najviac. Norma síce uvádza, že prietok možno znížiť na jednu tretinu, alebo, že projekt vetracieho zariadenia musí riešiť funkciu vetrania pre rôzne stavy tak, aby koncentrácia CO bola trvale pod prípustnou hodnotou 87 ppm, pri súčasne hospodárnej prevádzke, no nešpecifikuje spôsob riadenia ani technické požiadavky na snímače a automatizáciu. Norma popisuje, že vetranie môže byť navrhnuté s možnosťou prerušovaného vetrania alebo s dielčou prevádzkou viacerých paralelne zapojených zariadení, kedy musí byť prevádzka riadená automaticky, no ďalej nerozvádza ani nešpecifikuje opísané automatické riadenie. V praxi to môže viesť k manuálnemu alebo časovo riadenému spúšťaniu ventilátorov bez reálnej väzby na kvalitu vzduchu [6].

Moderné predpisy ako VDI 2053 a ČSN 73 6058 presadzujú dopytovo riadené vetranie (DCV) s meraním koncentrácií CO. VDI taktiež mimoriadne podrobne popisuje požiadavky na systém dohľadu nad CO. Takýto popis v slovenskej norme chýba [8, 9].

Štúdie naznačujú, že možnosť plynulej regulácie vetrania môže viesť k výraznej úspore energie bez zhoršenia kvality vzduchu [3].

VDI 2053 odporúča tiež:

- využitie jet-fan systémov namiesto rozsiahlych rozvodov,
- automatické vypínanie ventilátorov pri neobsadenosti garáže,
- zónovú reguláciu a delenie väčších garáží na samostatne riadené časti,
- monitorovanie CO v reálnom čase s vizualizáciou v systémoch BMS [9].

V kontexte európskej smernice EPBD a cieľov nZEB je neprípustné, aby národná norma obsahovala nedostatočné požiadavky na energetickú optimalizáciu vetrania. Takéto nedostatky brzdia modernizáciu budov a zvyšujú ich uhlíkovú stopu.

3. Návrh metodiky výskumu: Prípadová štúdia

Na exaktné preukázanie nedostatkov normy STN sa navrhuje realizácia prípadovej štúdie v modernej garáži, ktorá využíva pokročilý systém riadenia vetrania.

3.1 Cieľ a zámer prípadovej štúdie

Cieľom výskumu je experimentálne overiť reálne energetické úspory a zachovanie kvality vzduchu pri použití DCV v porovnaní s „klasickým“ systémom navrhnutým podľa STN 73 6058. Výsledky poslúžia ako podklad pre revíziu normy a pre kvantifikáciu ekonomických a environmentálnych dopadov.

3.2 Výber referenčného objektu

Pre účely štúdie je potrebné vybrať modernú podzemnú garáž (napr. v administratívnej budove alebo nákupnom centre), ktorej vetrací systém spĺňa nasledujúce kritériá:

- **Systém DCV:** Vetranie je riadené na základe meraní z CO senzorov (umiestnených vo vhodnej výške aspoň alebo viac ako 1,5 m nad podlahou v zmysle VDI 2053),
- **Regulácia výkonu:** Vetrací systém s možnosťou plynulej regulácie,
- **Možnosť monitoringu:** Existuje prístup k riadiacemu systému (MaR), ktorý umožňuje logovanie dát o koncentráciách CO, stave ventilátorov a ich okamžitej spotrebe energie alebo existuje možnosť do daného priestoru zariadenia na meranie popísaných veličín nainštalovať.

3.3 Zber a spracovanie dát

V referenčnom objekte bude prebiehať kontinuálny zber dát počas minimálne štrnástich dní, aby sa zachytili typické prevádzkové cykly. Zaznamenávané budú nasledujúce veličiny v 5-minútových intervaloch:

- **koncentrácie CO** (ppm) z každého senzora,
- **okamžitý príkon ventilátorov** (kW),
- **Výkon ventilátorov** (v %).
- **počet vozidiel v garáži** (napr. v spolupráci so systémom vjazdu/výjazdu).

Dáta budú vyhodnotené štatisticky (denné a týždenné priemery, maximá, korelácie CO – výkon). Z údajov bude vypočítaná špecifická spotreba energie.

3.4 Vytvorenie hypotetického modelu podľa STN

Na základe počtu parkovacích miest a predpokladaných prevádzkových hodín sa vytvorí výpočtový model tej istej garáže, avšak vetranej podľa STN, s dvoma scenármi:

- **Scenár A (Konštantná prevádzka):** Ventilátory bežia na 100 % výkonu počas celej prevádzkovej doby garáže (napr. od 6:00 do 22:00).
- **Scenár B (Dvojstupňová prevádzka):** V súlade s normou sa predpokladá, že systém beží na 1/3 výkonu počas doby so slabou prevádzkou a na 100 % výkonu počas definovaných špičiek (napr. 2 hodiny ráno a 2 hodiny poobede).

Pre oba scenáre sa na základe výkonu ventilátorov a definovaných prevádzkových hodín vypočíta teoretická denná a týždenná spotreba elektrickej energie.

3.5 Vyhodnotenie a očakávané výsledky

Hlavným výstupom bude porovnanie reálne nameranej spotreby energie DCV systému s vypočítanou spotrebou pre oba hypotetické scenáre podľa STN. Očakáva sa, že DCV systém dosiahne

výraznú úsporu spotreby energie oproti Scenáru A a zároveň udrží koncentrácie CO pod 50 ppm. Očakáva sa tiež zníženie emisií CO_2 z dodanej elektriny, ktoré by taktiež bolo vhodné kvantifikovať.

4. Diskusia

Výsledky navrhovanej prípadovej štúdie majú potenciál potvrdiť zásadný rozdiel medzi zastaranými návrhovými princípmi normy STN 73 6058 a modernými systémami dopytovo riadeného vetrania (DCV). Kým norma vychádza z fixných hodnôt prietokov a emisií, ktoré nereflektujú skutočné prevádzkové podmienky, systémy DCV umožňujú dynamickú reguláciu podľa okamžitých koncentrácií znečisťujúcich látok. Táto koncepcia znižuje spotrebu energie bez ohrozenia kvality vzduchu, čo bolo preukázané v mnohých zahraničných štúdiách.

Analýza ukazuje, že slovenská norma nie je kompatibilná so smerovaním európskej legislatívy v oblasti energetickej hospodárnosti budov (EPBD II, III) a s cieľmi nZEB. Nezohľadňuje potrebu inteligentného riadenia, merania kvality ovzdušia ani možnosti optimalizácie prevádzky prostredníctvom systémov BMS. V praxi to vedie k predimenzovaným zariadeniam, ktoré pracujú s neprimerane vysokým prietokom vzduchu, a tým k zbytočnej spotrebe elektrickej energie.

Predbežné odhady podľa dostupných publikácií naznačujú, že implementácia DCV v podzemných garážach môže priniesť výraznú úsporu elektrickej energie na v porovnaní s konštantne riadenými systémami. Súčasne sa zachová alebo dokonca zlepší kvalita vnútorného prostredia, koncentrácie CO sa znížia pod 50 ppm, čo je plne v súlade s odporúčaniami WHO a VDI 2053.

Ďalším prínosom je možnosť integrovať DCV systémy do inteligentných riadiacich platforiem budov, čo umožňuje zber dát, diaľkovú správu a adaptívnu prevádzku podľa obsadenosti či dennej doby. Tento prístup podporuje princípy „smart buildings“ a „data-driven facility management“, ktoré sú kľúčové pre udržateľné projektovanie.

Diskutovať možno aj ekonomický aspekt – vyššia počiatočná investícia do senzorov a regulácie je kompenzovaná znížením prevádzkových nákladov, pričom návratnosť investície je taktiež možné kvantifikovať.

Z hľadiska tvorby budúcich predpisov je potrebné, aby revidovaná STN 73 6058:

- zohľadnila aktuálne emisné profily vozidiel,
- stanovila prísnejšie limity CO v súlade s WHO,
- zaviedla metodiku pre návrh DCV, vrátane požiadaviek na senzory, algoritmy riadenia a zónovú reguláciu,
- reflektovala energetické a environmentálne ciele EÚ.

5. Záver

Porovnávacia analýza jednoznačne potvrdzuje zastaranosť slovenskej technickej normy STN 73 6058 a poukazuje na nevyhnutnosť jej komplexnej revízie. Súčasné znenie normy nereflektuje technologický pokrok, moderné požiadavky na ochranu zdravia ani princípy energetickej efektívnosti, ktoré dnes tvoria základný pilier navrhovania technických systémov budov.

Predpokladá sa, že výsledky plánovaného výskumu preukážu, že dopytovo riadené vetranie (DCV) umožňuje výrazné zníženie spotreby energie bez negatívneho vplyvu na kvalitu vnútorného prostredia. Zároveň sa očakáva, že výskum odhalí paradox súčasnej slovenskej normy – napriek tomu, že STN 73 6058 povoľuje vyššie koncentrácie oxidu uhoľnatého ako medzinárodné štandardy, metodika návrhu v nej uvedená vedie k predimenzovaným a energeticky neefektívnym systémom.

Ďalší rozvoj výskumu by sa mal zamerať na analýzu štandardov pre systémy odvádzania dymu a tepla, keďže v súčasnej praxi sú tieto systémy často prepojené s prevádzkovým vetraním garáží. Český ekvivalent normy STN umožňuje kombináciu systémov s rôznymi účelmi za podmienky

splnenia minimálnych požiadaviek pre každý z nich, čo predstavuje progresívny prístup hodný nasledovania. Rovnako aj medzinárodné štandardy pripúšťajú integráciu týchto funkcií, čo podčiarkuje potrebu, aby slovenská norma reflektovala tieto trendy. V neposlednom rade je potrebné, aby revidovaná norma zohľadnila aj rastúci význam elektromobility.

Komplexná revízia STN 73 6058 by tak mala smerovať k integrovanému, energeticky efektívnemu a bezpečnému prístupu k vetraniu podzemných garáží, ktorý bude v súlade s európskymi cieľmi udržateľného rozvoja a so súčasným technickým poznaním.

Poďakovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja SR v rámci projektu APVV-21-0144, Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR v rámci grantu VEGA 01/0118/23.

Literatúra

[1] AHRAE Handbook: Heating, Ventilating, and Air-conditioning applications, Atlanta: ASHRAE, 2019, SI Edition.
[2] KARTI, M. and AYARI, A. M.: Overview of Existing Regulations for Ventilation Requirements of Enclosed Vehicular Parking Facilities. USA: ASHRAE. [online] 1999. Dostupné na: https://xp20.ashrae.org/Manuscript/AuthorsTemplateExample_Transactions.pdf
[3] GIL-LOPEZ, T. – SANCHEZ-SANCHEZ, A. and GIMENEZ-MOLINA, C.: Energy, environmental and economic analysis of the ventilation system of enclosed parking garages. Discrepancies with the current regulations. *Applied Energy*. [online]. 2014, č. 113, s. 622-630 [cit. 31.10.2025]. ISSN 0306-2619. Dostupné na: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913006478
[4] *TZB-info*, Návrh větrání garáží (II). [online]. [cit. 31.10.2025]. Dostupné na: https://vetrani.tzb-info.cz/teorie-a-vypocty-vetrani-klimatizace/4738-navrh-vetrani-garazi-ii
[5] *COMAG IR,* Energy Savings in Enclosed Parking Garages. [online]. [cit. 31.10.2025]. Dostupné na:
[6] STN 73 6058:1987 Hromadné garáže. Základne ustanovenia.
[7] WHO 2000 Air Quality Guidelines for Europe. Copenhagen. WHO Regional Publications, European Series, No. 91, ISBN 92-890-1358-3
[8] ČSN 73 6058:2011 Jednotlivé, řadové a hromadné garáže.
[9] VDI 2053:2014 Raumlufttechnik. Garagen. Entlüftung (VDI-Lüftungsregeln) Air conditioning. Car parks. Exhaust ventilation. (VDI Ventilation Code of Practice).
[10] BS 7346-7:2013 Components for smoke and heat control systems – Part 7: Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control system for covered car parks.

Angelika Václavová, Michal Krajčík[1]
Teória a technika prostredia budov, 3. ročník

HODNOTENIE STATICKÝCH A SIMULAČNÝCH METÓD PRI NÁVRHU OPATRENÍ NA ZLEPŠENIE ENERGETICKEJ EFEKTÍVNOSTI TYPICKÝCH RODINNÝCH DOMOV

EVALUATION OF STATIC AND SIMULATION METHODS IN DESIGNING MEASURES TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY OF TYPICAL FAMILY HOUSES

Abstract
Buildings are among the largest energy consumers and play a key role in contributing to global warming. Conventional analytical models used in energy assessments often provide limited accuracy, whereas 3D models applied in dynamic energy simulations offer a more precise and transparent insight into energy flows. This enables a better identification of potential improvements and the underlying causes of performance gaps. This paper presents a case study of an existing family house evaluated during the winter season using measured data. The analysis assessed indoor climate compliance with standards and included a 3D thermal simulation in DesignBuilder. Based on identified deficiencies, energy-saving measures were proposed and their impact assessed through an energy balance analysis. Finally, a comparison between analytical calculations in MS Excel and simulation results revealed discrepancies, highlighting how different methods can lead to varying conclusions about energy efficiency.

Kľúčové slová / Key Words
Vnútorné prostredie, merané dáta, energetická efektivita, simulácia, 3D model

1. Úvod

Energetické simulácie predstavujú neoddeliteľnú súčasť návrhu udržateľných budov. Umožňujú optimalizovať riešenia v každej etape plánovania tak, aby boli energeticky, ekonomicky aj environmentálne efektívne. Modelovanie zároveň zohráva dôležitú úlohu pri hodnotení výkonnosti budovy – od návrhu až po prevádzku, kde kalibračné postupy napomáhajú porovnať predpokladané správanie s reálnou prevádzkou [1], [2].

Táto práca predstavuje prípadovú štúdiu zameranú na demonštráciu využitia simulácií v programe DesignBuilder pri hodnotení vplyvu energeticky úsporných opatrení počas renovácie rodinného domu. Úvodná časť výskumu zahŕňa výsledky meraní tepelnej pohody a kvality vnútorného vzduchu, ktoré slúžia na posúdenie komfortných podmienok a kalibráciu simulačného modelu.

[1]Angelika Václavová, Ing., Michal Krajčík, prof., Ing., PhD., Stavebná fakulta STU Bratislava, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava, SR

2. Požiadavky na kvalitu vnútorného prostredia

2.1 Definícia vnútorného prostredia

„Kvalita vnútorného prostredia“ označuje výsledok hodnotenia podmienok vo vnútri budovy, ktoré ovplyvňujú zdravie a pohodu jej užívateľov. Hodnotenie vychádza z parametrov, ako sú teplota, vlhkosť, intenzita vetrania a koncentrácia škodlivín vo vnútornom ovzduší [3].

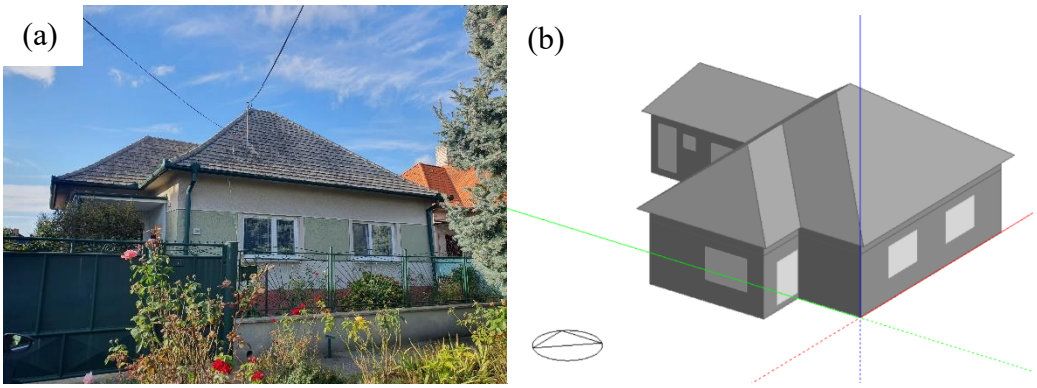
2.2 Návrhové hodnoty a požiadavky

Vzhľadom na rastúce výzvy globálneho otepľovania nesú architekti a odborníci zodpovednosť za navrhovanie budov, ktoré sú energeticky úsporné, poskytujú zdravé a pohodlné vnútorné prostredie (vrátane tepelnej pohody), znižujú prevádzkové náklady a zároveň minimalizujú dopad na životné prostredie [4].

Odporúčané teplotné rozsahy pre vykurovanie a chladenie obytných miestností podľa normy EN 16798-1 [5] sú pri návrhu nových a obnovovaných budov stanovené na 20,0–25,0 °C počas zimného obdobia a 23,0–26,0 °C počas letného obdobia. Národné vyhlášky č. 99/2016 Z. z. [6] a č. 259/2008 Z. z. [7] stanovujú odporúčaný rozsah relatívnej vlhkosti vnútorného vzduchu na 30 % až 70 %. Znečistenie vnútorného ovzdušia vzniká v dôsledku pôsobenia vnútorných a vonkajších zdrojov, ako aj chemických reakcií medzi znečisťujúcimi látkami a oxidačnými činidlami z týchto zdrojov. Odporúčané limitné hodnoty koncentrácie CO_2 podľa normy EN 16798-1 [5] sú pre obnovované budovy stanovené na 800 ppm nad úrovňou vonkajšej koncentrácie v obytných miestnostiach a 550 ppm nad vonkajšou koncentráciou v spálňach.

3. Prípadová štúdia rodinného domu a hodnotenie vnútorného komfortu

Predmetom prípadovej štúdie je rodinný dom, znázornený na *obr. 1*, nachádzajúci sa v južnej časti Slovenska. Objekt bol realizovaný začiatkom 70. rokov 20. storočia a predstavuje samostatne stojacu murovanú stavbu so štvorcovým pôdorysom, valbovou strechou, nevykurovaným podkrovím a čiastočným podpivničením. Súčasťou objektu je aj prístavba so zastrešením plochou strechou.

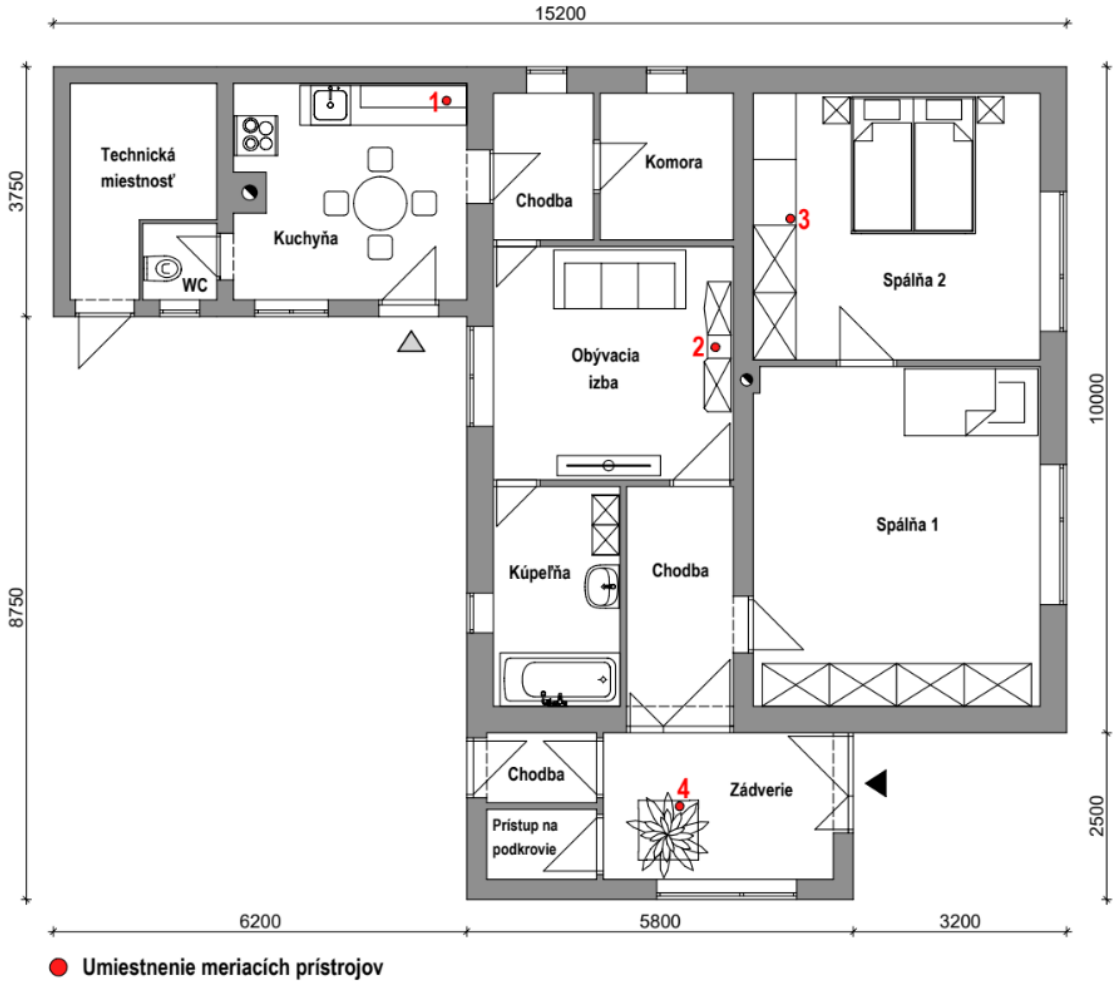


Obrázok 1: Prípadová štúdia: foto RD (a), model RD (b)

Budova sa nachádza v pôvodnom stave, bez realizovaných rekonštrukčných zásahov. Obvodové steny hlavnej časti objektu sú murované z pálených tehál, pričom prístavba je zhotovená z pórobetónových tvárnic. Obvodový plášť, podlahy ani stropy nie sú zateplené. Výplne otvorov tvoria okná s drevenými alebo plastovými rámami a jednoduchým dvojitým zasklením. Počas obdobia merania bol objekt obývaný jednou osobou.

3.1 Zber údajov

Na hodnotenie úrovne vnútorného komfortu podľa normy EN 16798-1 [5] a na získanie podkladov pre energetické výpočty boli počas zimného obdobia, v období od 19. decembra 2024 do 2. januára 2025, realizované merania fyzikálnych veličín. Dataloggery zaznamenávali teplotu vzduchu, relatívnu vlhkosť a koncentráciu CO_2 v dvojminútových intervaloch v reprezentatívnych miestnostiach – kuchyni, obývacej izbe a spálni, teda v priestoroch s najčastejším pobytom užívateľa. Merania prebiehali aj v nevykurovanej vstupnej časti objektu vzhľadom na pôvodné drevené výplne otvorov. Počas celého meracieho obdobia boli súčasne monitorované aj vonkajšie klimatické podmienky. Pôdorys domu s vyznačením umiestnenia meracích zariadení je uvedený na *obr. 2*.

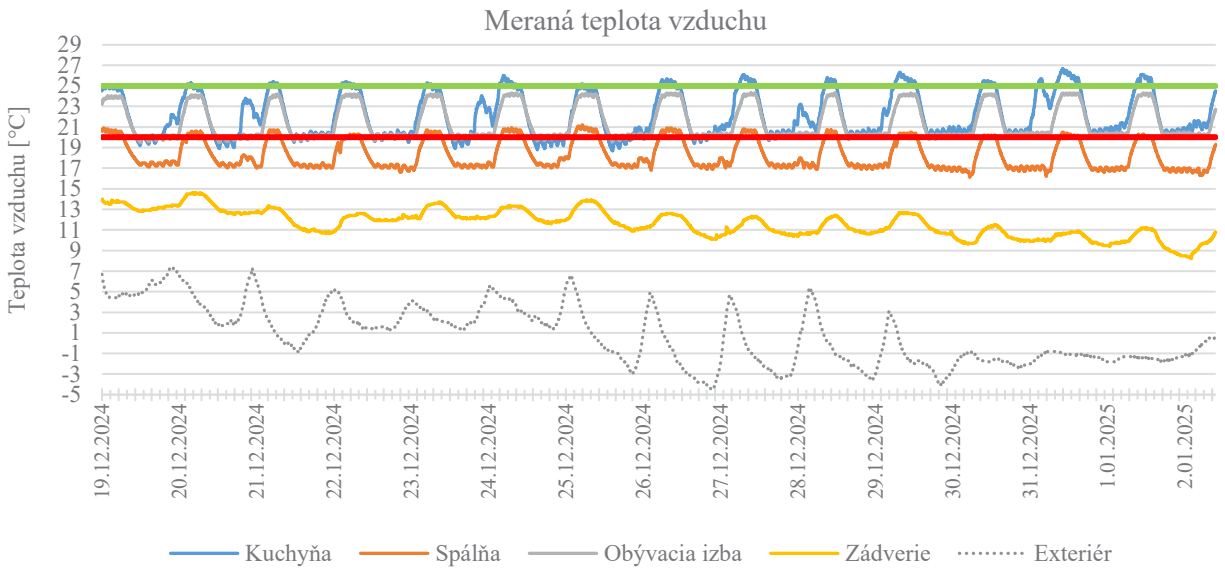


Obrázok 2: Pôdorys a umiestnenie meracích prístrojov v rodinnom dome prípadovej štúdie

3.2 Analýza nameraných údajov

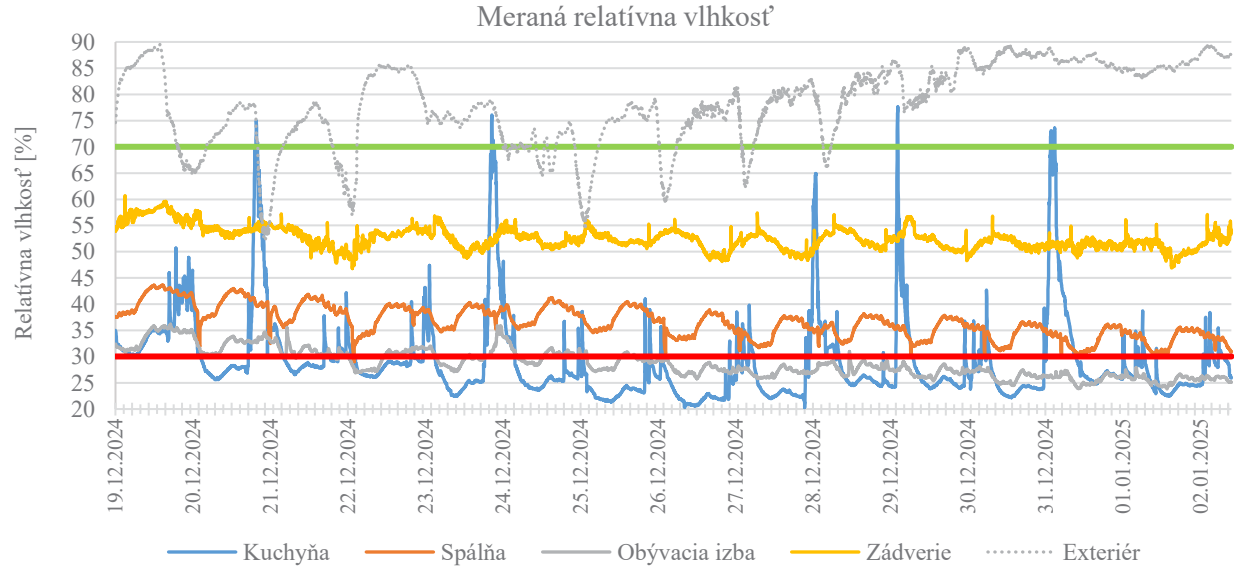
Výsledky meraní sú zobrazené na *obr. 3* až *5*. Z *obr. 3* je zrejmé, že vnútorná teplota v jednotlivých miestnostiach počas sledovaného obdobia bola približne rovnaká každý deň.. Graf zároveň znázorňuje nočný režim vykurovania, ktorý sa prejavuje výrazným poklesom teploty približne od 23:00 do 14:00 hod., po ktorom nasleduje jej postupný nárast až do neskorých večerných hodín. Menšie výkyvy v priebehu dňa sú spôsobené krátkodobým vetraním. Paralelné zobrazenie vnútorných a vonkajších teplôt poukazuje na ich priamu väzbu, čo možno pripísať absencii tepelnoizolačných vrstiev v obalových konštrukciách. Nižšie teploty vo vstupnej nevykurovanej časti

objektu sú čiastočne výsledkom netesností pôvodných drevených výplní otvorov. Priemerná vnútorná teplota v miestnostiach s najčastejším pobytom obyvateľa dosiahla 20,6 °C, čo je mierne pod optimálnou hodnotou, avšak stále v súlade s požiadavkami príslušnej normy. Priemerná vonkajšia teplota počas merania predstavovala 0,8 °C, čo vytváralo vhodné podmienky pre realizáciu zimnej energetickej analýzy objektu.



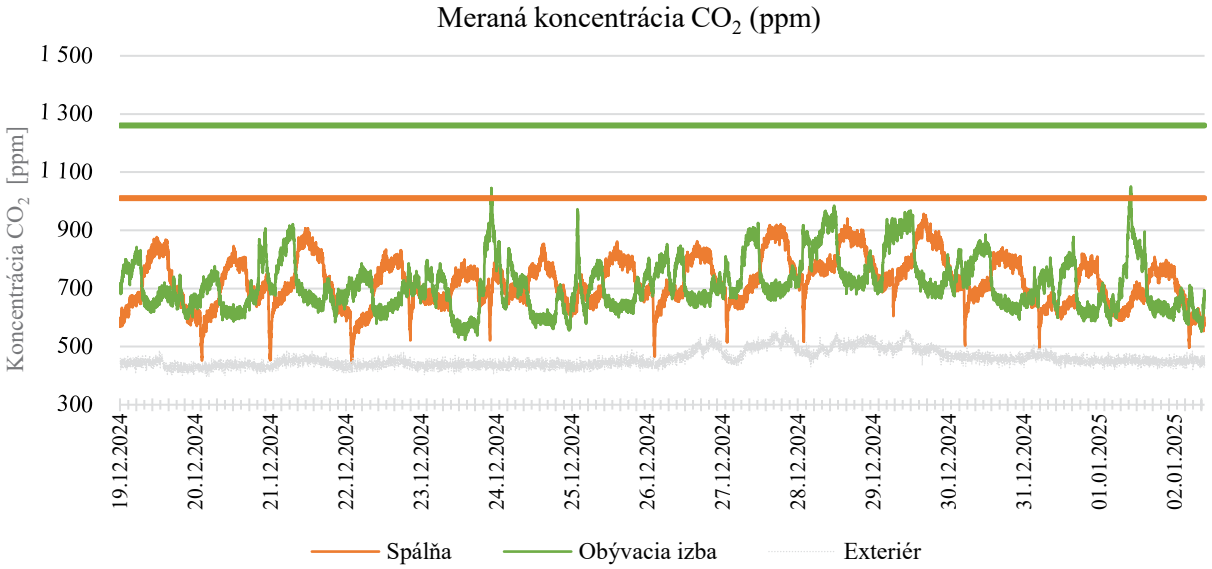
Obrázok 3: Priebeh teploty vzduchu v rodinnom dome

Údaje uvedené na *obr. 4* naznačujú, že očakávaný pokles relatívnej vlhkosti so zvyšujúcou sa teplotou vzduchu môže viesť k suchému vnútornému prostrediu. V kuchyni sa v ranných hodinách prejavili výrazné výkyvy relatívnej vlhkosti v dôsledku varných procesov. Namerané hodnoty relatívnej vlhkosti v obývaných miestnostiach boli nízke, s priemernou hodnotou 31 %, čo sa približuje k hranici prijateľného minima.



Obrázok 4: Priebeh relatívnej vlhkosti vzduchu v rodinnom dome

Obr. 5 znázorňuje namerané hodnoty koncentrácie CO_2, ktoré boli monitorované iba v obývacej izbe a spálni, keďže ide o priestory s najčastejším využívaním počas zimného obdobia a s minimálnym vplyvom vonkajších faktorov, ako je napríklad varenie. Počas celého meraného obdobia zostávala koncentrácia CO_2 v spálni pod odporúčanou hranicou 550 ppm nad priemernou vonkajšou hodnotou 460 ppm. V obývacej izbe boli namerané hodnoty celkovo vyhovujúce, avšak občas sa vyskytli krátkodobé nárasty koncentrácie CO_2 až do úrovne približne 1000 ppm, najmä vo večerných hodinách.



Obrázok 5: Priebeh koncentrácie CO2 vo vybraných miestnostiach

3.3 Návrh energeticky úsporných opatrení pre obalové konštrukcie budovy

Na základe analýzy kvality vnútorného prostredia boli v rodinnom dome identifikované nedostatky v oblasti tepelného komfortu. Na ich odstránenie boli navrhnuté energeticky úsporné opatrenia zamerané na obalové konštrukcie budovy. Výpočty boli realizované dvoma metódami – zjednodušeným jednorazovým výpočtom v programe MS Excel podľa noriem CEN a platných národných predpisov a dynamickou energetickou simuláciou v prostredí DesignBuilder. Následné porovnanie výsledkov poukázalo na výrazné rozdiely medzi oboma prístupmi.

3.4 Identické vstupné parametre dvoch výpočtových metód

Na stanovenie počiatočných odhadov potreby energie boli výpočty realizované na základe vyššie uvedených nameraných údajov. Vstupné parametre boli zvolené tak, aby zabezpečili vzájomnú porovnateľnosť a realistické vyhodnotenie oboch výpočtových metód.

Zohľadnili sa klimatické podmienky, vnútorné tepelné zisky, režim užívania budovy, intenzita výmeny vzduchu a tepelno-technické vlastnosti obalových konštrukcií. Ako reprezentatívna hodnota bola v oboch prístupoch použitá priemerná vnútorná teplota 18,4 °C zaznamenaná počas meracieho obdobia, pri relatívnej vlhkosti 31 %. Miera výmeny vzduchu bola stanovená na 0,72 h^{-1}, Výpočty boli vykonané pre jednozónový model s vykurovanou podlahovou plochou 108 m^2 a svetlou výškou miestností 2,5 m.

3.5 Rozdiely vo vstupných parametroch dvoch výpočtových metód

Medzi oboma výpočtovými metódami sa prejavili rozdiely vo vstupných parametroch, ktoré vyplývajú z prednastavených hodnôt softvéru DesignBuilder alebo zo zjednodušeného postupu výpočtu v Exceli. V programe Excel bola použitá priemerná vonkajšia teplota 0,8 °C získaná z meraní, zatiaľ čo simulačný model využíval podrobné klimatické údaje z referenčného testovacieho roka (TRY) pre lokalitu Nitra s priemernou teplotou 0,39 °C. Údaje o slnečnom žiarení boli v Exceli čerpané z národných noriem v mesačnom rozlíšení, kým simulácia pracovala s dynamickými údajmi z databázy TRY. Miera výmeny vzduchu bola určená výpočtom a aplikovaná rovnakým spôsobom v oboch prístupoch. V Exceli boli vnútorné tepelné zisky zadané konštantnou hodnotou 4 W/m², zatiaľ čo v simulačnom modeli bol použitý časový harmonogram využívania priestoru. Pre model v programe DesignBuilder bola zvolená šablóna „On 24/7“ a pre jedinú obyvateľku objektu bol uplatnený metabolický faktor 0,85.

4. Potreba energie na vykurovanie

Potreba tepla na vykurovanie bola stanovená na základe tepelno-technických vlastností obalových konštrukcií budovy, ktoré boli určené z dostupnej projektovej dokumentácie a obhliadky objektu. V *tab.1.* sú uvedené hodnoty súčiniteľa prechodu tepla (U) a tepelného odporu (R) pre jednotlivé konštrukčné prvky budovy v pôvodnom stave aj po navrhovanej obnove.

Tabuľka 1: Tepelno-technické vlastnosti obalových konštrukcií budovy

U - hodnota stavebných prvkov (W/m^2.K)			
	Súčasný stav	Návrhový stav	STN
Obvodová stena	0,74 ÷ 1,68	0,216	0,22
Otvorové konštrukcie	1,4 ÷ 4,2	0,688	0,85
Plochá strecha	0,972	0,149	0,15
Stropná konštrukcia	0,792	0,137	0,20
R - hodnota podlahy na teréne (m^2.K/W)			
Podlaha na teréne	0,674	4,403	2,5

*strop pod nevykurovaným priestrorom
** STN 73 0540-2+Z1+Z2 Tepelnotechnické vlastnosti budov a stavebných konštrukcií

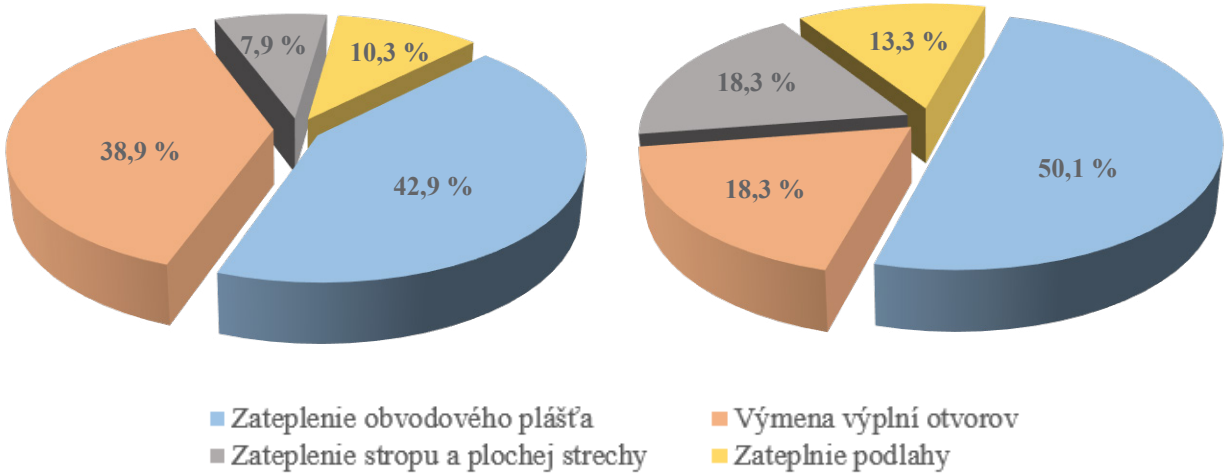
Návrh obnovy bol spracovaný v súlade s národnou normou STN 73 0540 pre tepelno-technické vlastnosti budov. *Tab 2.* porovnáva potrebu tepla na vykurovanie vypočítanú pomocou metódy v programe Excel a výsledky dynamickej simulácie v prostredí DesignBuilder. Počas meraného obdobia bola sledovaná aj skutočná spotreba zemného plynu, ktorá dosiahla hodnotu 18,650 kWh/m^2. Porovnanie nameraných a vypočítaných hodnôt preukázalo prijateľnú zhodu. Zistené rozdiely možno pripísať zjednodušeniam vo výpočtovom modeli, najmä predpokladu konštantnej vnútornej teploty v celej zóne, hoci niektoré miestnosti neboli vykurované alebo boli vykurované len čiastočne. Odchýlky vo výsledkoch môžu byť čiastočne spôsobené aj použitím rozdielnych databáz vonkajších teplôt.

Po návrhu energeticky úsporných opatrení bol ich vplyv na potrebu tepla na vykurovanie vyhodnotený samostatne (pozri „Energeticky úsporné opatrenia“ v *tab. 2*) aj v kombinácii (pozri „Potreba energie po kompletnom zateplení“ v *tab. 2*). Uvedené hodnoty predstavujú vypočítanú potrebu tepla po realizácii tepelnoizolačných opatrení.

Tabuľka 2: Vypočítaná a simulovaná potreba tepla na vykurovanie

Potreba tepla	MS Excel	DesignBuilder
	(Wh/m^2)	
Súčasná potreba tepla	20 675	21 712
Potreba energie po kompletnom zateplení	5 779	6 244
Energeticky úsporné opatrenia		
Zateplenie obvodového plášťa	13 625	15 562
Výmena výplní otvorov	18 094	16 145
Zateplenie stropu a plochej strechy	18 092	20 572
Zateplenie podlahy	18 807	20 242

Podiely jednotlivých konštrukčných prvkov na celkových energetických úsporách sú znázornené na *obr. 6* pre obe výpočtové metódy. Ako vyplýva z *tab. 2* a *obr. 6*, vypočítaná potreba tepla na vykurovanie v pôvodnom stave je v oboch metódach porovnateľná. Podobne aj výsledky po úplnom zateplení domu vykazujú relatívne blízke hodnoty. Grafy však ukazujú, že rozsah energetických úspor pripadajúcich na jednotlivé prvky obalových konštrukcií sa môže výrazne líšiť v závislosti od použitej metódy výpočtu.



Obrázok 6: Podiel jednotlivých energeticky úsporných opatrení na celkových energetických úsporách: (vľavo) DesignBuilder vs. (vpravo) MS Excel

Najväčší rozdiel sa prejavil pri výplniach otvorov – výpočet v Exceli odhaduje ich podiel na úrovni 18,3 %, zatiaľ čo simulačný model až 38,9 %. Po výmene okien a dverí sa tepelné straty infiltráciou znížili približne o 30,3 %, čo predstavuje úsporu približne 17,5 W/K. V pôvodnom stave bola miera výmeny vzduchu použitá vo výpočte 0,72 h^{-1}, pričom po realizácii navrhovaného opatrenia – výmene okenných a dverných konštrukcií – bola podľa normy uvažovaná hodnota 0,5 h^{-1}.

5. Záver

Táto prípadová štúdia sa zaoberala hodnotením kvality vnútorného prostredia v typickom rodinnom dome, pričom porovnávala namerané hodnoty s limitmi stanovenými v platných normách. Na základe experimentálnych údajov bola vypočítaná potreba tepla na vykurovanie pred a po aplikácii tepelnoizolačných opatrení na obalové konštrukcie budovy. Výpočty boli realizované dvoma

prístupmi – zjednodušenou metódou v programe MS Excel podľa noriem CEN a národných predpisov a dynamickou simuláciou v programe DesignBuilder.

Oba prístupy preukázali podobné zníženie potreby tepla po zateplení, avšak jednotlivé energeticky úsporné opatrenia boli každou metódou interpretované odlišne. Percentuálne úspory energie dosiahnuté zateplením obvodových stien, podlahy a stropu boli vo väčšine prípadov porovnateľné, s maximálnou odchýlkou približne 10 %. Naopak, pri výmene výplní otvorov sa rozdiely prejavili výraznejšie – až do 20 %. Takéto nezhody môžu viesť k rozdielnym záverom pri posudzovaní ekonomickej efektívnosti obnovy, čo je obzvlášť významné pri väčších a zložitejších objektoch, kde môžu mať tieto rozdiely výrazný dopad.

Literatúra

[1] Jain, N., Burman, E., Mumovic, D., Davies, M. Managing energy performance in buildings from design to operation using modelling and calibration. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2021;42(5):517-531. doi:10.1177/01436244211008317

[2] Bergero, S., & Chiari, A. (2021, November). Validation and calibration of dynamic energy models: energy audit of a public building. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2116, No. 1, p. 012107). IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/2116/1/012107

[3] Kurnitski, J. (2025). Model Indoor Environmental Quality regulation to fulfil new provisions of 2024 EPBD recast. The REHVA European HVAC Journal, pp. 5-13, ISSN 1307-3729

[4] Abba, H. Y., Majid, R. A., Ahmed, M. H., & Gbenga, O. (2022). Validation of designbuilder simulation accuracy using field measured data of indoor air temperature in a classroom building. Management, 7(27), 171-8. doi: 10.35631/JTHEM.727014

[5] STN 16798-1:2019-11 (127015) Energetická hospodárnosť budov. Vetranie budov. Časť 1: Vstupné údaje o vnútornom prostredí budov na navrhovanie a hodnotenie energetickej hospodárnosti budov – kvalita vzduchu, tepelný stav prostredia, osvetlenie a akustika. Modul M1-6, 2019

[6] Vyhláška MZ SR č. 99/2016 o podrobnostiach o ochrane zdravia pred záťažou teplom a chladom pri práci.

[7] Vyhláška MZ SR č. 259/2008 o podrobnostiach o požiadavkách na vnútorné prostredie budov a o minimálnych požiadavkách na byty nižšieho štandardu a na ubytovacie zariadenia.

THEORY AND STRUCTURES OF BUILDINGS

Ľubomír Adamec [1]***;***
Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník 4.

ŠTÚDIA VPLYVU UMIESTNENIA NÍZKOEMISNEJ VRSTVY V ZÁVISLOSTI NA PREHRIEVANIE BUDOV SO ZASKLENOU FASÁDOU POČAS LETNÉHO OBDOBIA

A STUDY OF THE IMPACT OF THE PLACEMENT OF A LOW-EMISSION LAYER ON THE OVERHEATING OF BUILDINGS WITH A GLAZED FACADE DURING THE SUMMER PERIOD

Abstract
The article focuses on a study examining the impact of low-emissivity coating considering the overheating in buildings during hot summer days. The case involves a single space with a fully glazed facade. The modeled room represents a part of the building, approximately 5 metres deep and with a structural height of about 3 meters The study addresses the problem of overheating where the outdoor boundary conditions are defined for Bratislava. For the purpose of the simulation, the most extreme day of the year was selected, corresponding to the period of maximum thermal stress on the facade for this location (Slovakia). The orientation of the facade on western side was selected according to the maximum temperature. Consequently, four simulation variants were created, where the first variant was modeled without the low—emissivity coating. The second variant included the low-emissivity coating and its positioning was on the inner side of the glazing while the following variants gradually shifted outwards, from the interior side toward the exterior side. In conclusion, the results were evaluated and the impact on indoor overheating was determined, even though the entire model was considered to be a non-air-conditioned space.

Kľúčové slová / Key Words
Simulácia, zasklenie, nízkoemisná vrstva, prehrievanie budov, fasáda, teplota

1. Úvod

Energetická účinnosť sa stala jednou z hlavných priorít pri navrhovaní budov a opláštenia budovy – najmä priehľadné prvky – zohrávajú rozhodujúcu úlohu. Zasklenie nielenže prispieva k tepelným stratám v zime, ale aj k riziku prehrievania v lete. Významným technologickým riešením, ktoré sa zavádza od druhej polovice 20. storočia, je nízkoemisný (low-e) povlak nanášaný na sklo. Jeho hlavnou funkciou je znížiť prenos tepla žiarením, pričom v závislosti od typu môže tiež regulovať solárne tepelné zisky, a tým aj prehrievanie interiéru [4].

Prvé experimenty s nízkoemisívnymi nátermi siahajú do 60. rokov 20. storočia. V 70. rokoch 20. storočia spoločnosť Pilkington zaviedla rozsiahlu výrobu pyrolytických (tvrdých) náterov na báze oxidu cínu dopovaného fluórom (SnO_2\:F) [9]. Počas 80. rokov 20. storočia umožnili naprašované viacvrstvové „mäkké“ nátery s obsahom striebra novú úroveň výkonu, kombinujúc vysokú

[1] Ľubomír Adamec, Ing., Stavebná fakulta, STU v Bratislave, SR, lubomir.adamec@stuba.sk

priepustnosť viditeľného svetla s veľmi nízkou priepustnosťou tepla. Odvtedy sa nízkoemisné zasklenie stalo štandardom v architektonických aplikáciách, pričom ročne sa vyrobia milióny metrov štvorcových.

Nízko-emisioné povlaky sa skladajú z nanometrových vrstiev kovov (zvyčajne striebra) a oxidov, ktoré odrážajú dlhovlnné infračervené žiarenie, čím znižujú U-faktor (tepelné straty) [14]. Pri problémoch s prehrievaním je však kľúčový koeficient solárneho tepelného zisku (SHGC alebo g-hodnota):

Pasívny nízkoemisný (s vyšším SHGC) prepúšťa viac slnečného žiarenia, vhodný pre chladnejšie podnebie, kde sú zimné solárne zisky prospešné.

Nízkoemisná solárna regulácia (nižšia SHGC) blokuje viac slnečnej energie, čím znižuje riziko prehriatia v lete – čo je výhoda v miernom a teplom podnebí.

Výskum účinkov prehriatia

Viaceré štúdie potvrdzujú, že správny výber typu nízkoemisného zasklenia silne ovplyvňuje tepelnú pohodu v interiéri: hodnotili sa nízkoemisné fólie v hoteli a preukázali pokles dopytu po chladení počas leta [6]. Zistilo sa, že parametre zasklenia (najmä SHGC), spolu s tienením a nočným vetraním, sú rozhodujúce pre prevenciu prehrievania [11]. V jednej štúdio sa navrhol optimalizačný rámec pre dvojité nízkoemisné okná, ktorý vyvažuje energetickú účinnosť v zime s rizikom letného prehrievania [12]. Venkiteswaran a kolektív zhrnuli prípadové štúdie z tropického/subtropického podnebia a potvrdili, že nízkoemisné zasklenie s reguláciou slnečného žiarenia výrazne znižuje dopyt po chladení. Výskum zároveň zdôrazňuje kompromis: veľmi nízke SHGC môže znížiť prehrievanie, ale môže tiež eliminovať žiaduce zimné solárne zisky, čím sa zvyšuje vykurovacie zaťaženie. Z tohto dôvodu sa odporúča komplexné sezónne hodnotenie (napr. pomocou smerníc CIBSE TM59/TM52). [13].

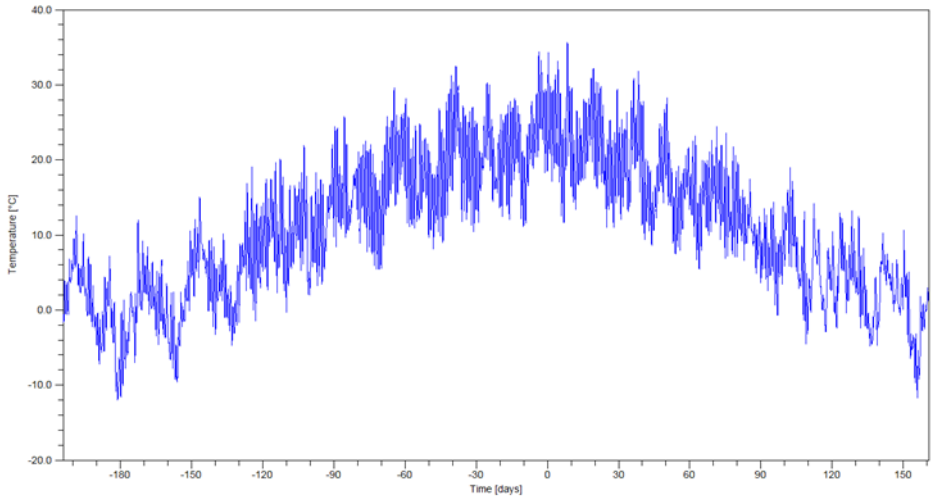
1.1 Stanovenie maximálneho tepelného namáhania na fasáde a jej orientácie

Simulácie sú robené v programe Voltra [1]. Voltra je simulačný program vyvíjaný spoločnosťou Physibel, ktorý sa používa celosvetovo. Voltra umožňuje dynamické funkcie, ktoré umožňujú širší okruh okrajových podmienok.

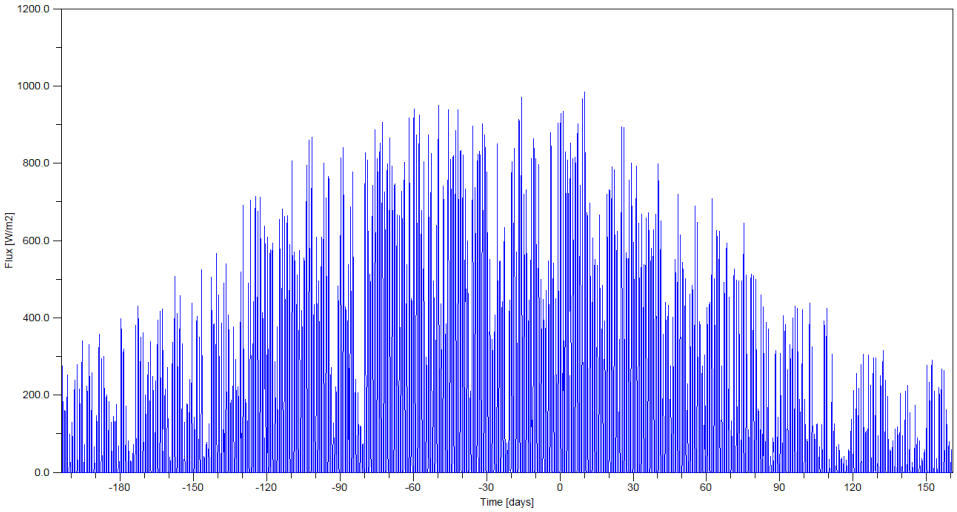
Pri simulácií extrémnych vonkajších teplôt nie je potrebné simulovať celý klimatický rok a preto v tejto simulácii stačí simulácia krátkeho úseku, ktorý tvorí jeden deň s maximálnou teplotnou záťažou. Na to, aby sa určil deň s maximálnou teplotnou záťažou sa namodelovala čierna kocka, kde každej strane kocky sa zisťovala maximálna teplota v rámci klimatického roku. Modelovaná kocka predstavuje zmenšený objekt s objemom 1 m^3. Čierny povrch kocky ma solárny absorpčný faktor 0,9, Tento malý objekt bol namodelovaný ako ľahký izolačný materiál so súčiniteľom tepelnej vodivosti λ = 0.040 W/(m . K), hustotou ρ = 50 kg/m^3 , mernou tepelnou kapacitou c = 1000 J/(kg . K). Vonkajšie klimatické okrajové podmienky sa určili pre Bratislavu. Tieto okrajové podmienky pozostavajú z teplotných dát, z globálnej a difúznej radiácie a solárnej radiácie, ktoré sa vložili do modelu ako funkcia (viď. Obr.1,2,3) Celkový súčiniteľ prestupu tepla je U = 13,5 W/(m^2 .K). Časový interval výpočtu pre jeden rok je s 30 minútovými intervalmi. Výsledky simulácii pre určenie maximálnej teplotnej záťaže za pomoci čiernej kocky je znázornený na Obr.4., kde vidieť graf, s hodnotami v rámci celého roka. Polohu kontrolných bodov pre teplotu na povrchu pri čiernej kocke je vidieť na obr.5, kde sa za pomoci súradnicovej osi určili body na strede každého povrchu. Každý povrch v rámci kocky reprezentuje časť budovy ako sú: strecha, podlaha, severná, východná, južná

a západná fasáda. Maximálne hodnoty pre jednotlivé povrchy viď. Obr.6. Výsledné hodnoty pre Bratislavu sú naslednovné:

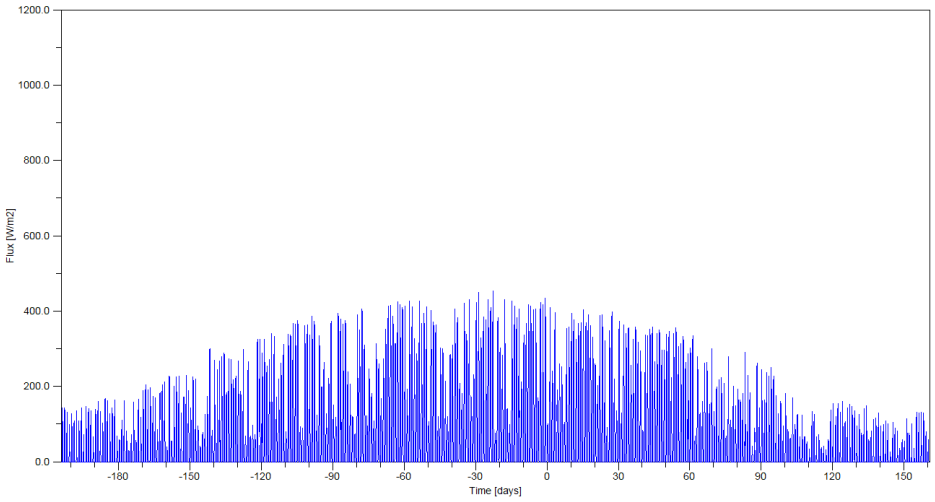
podlaha	deň 205, to je 24. júl
strecha	deň 205, to je 24. júl
Sever	deň 166, to je 15. jún
Západ	deň 205, to je 24. júl
Juh	deň 280, to je 7. október
Východ	deň 191, to je 10. jún



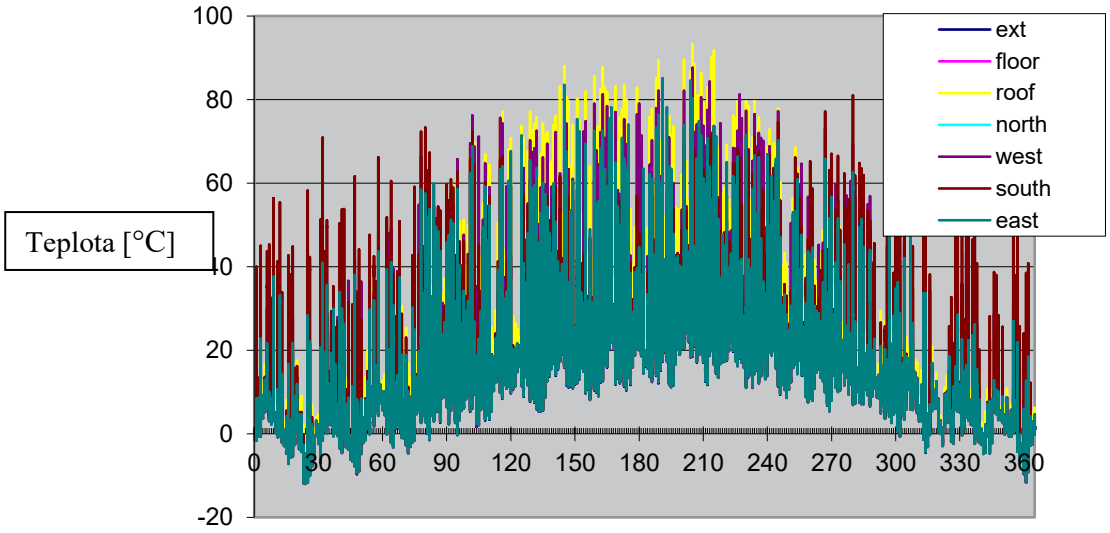
Obr. 1: Ročná teplota pre Bratislavu



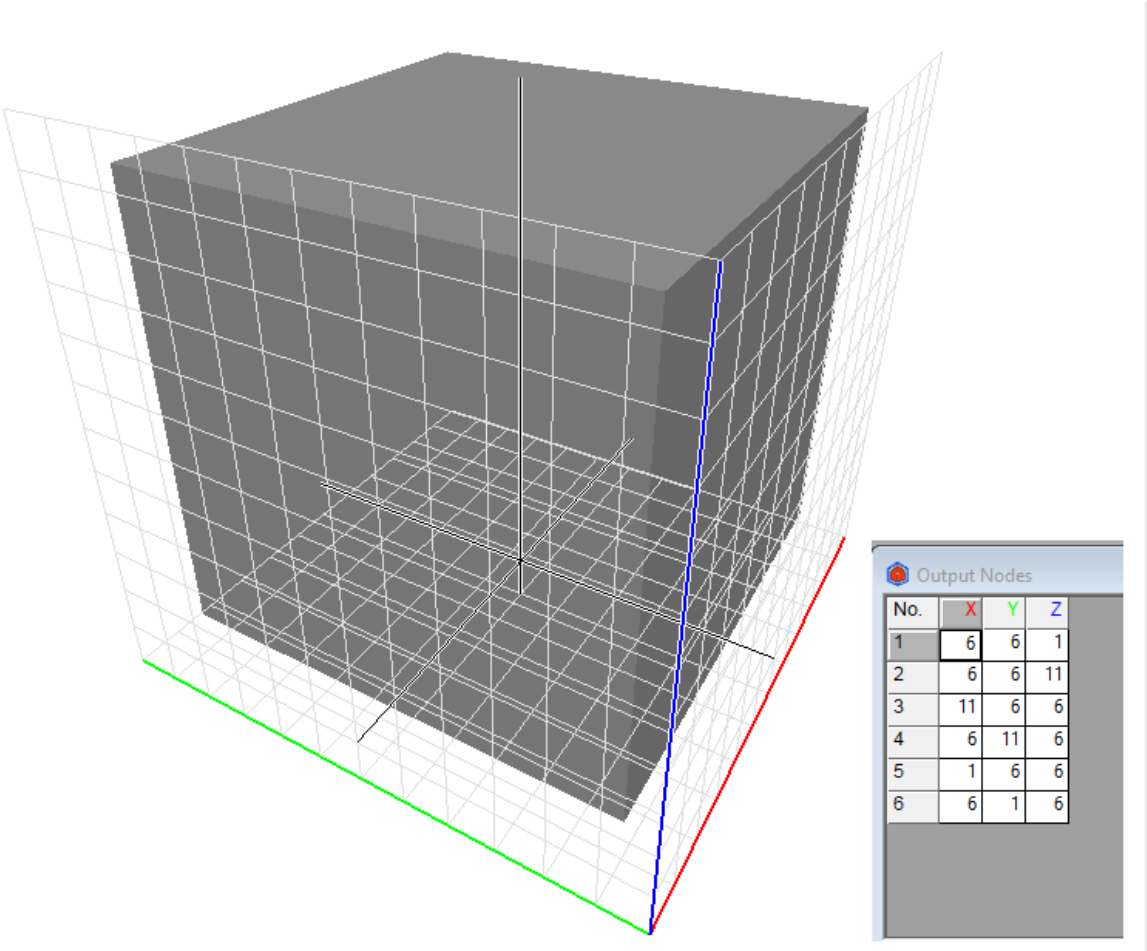
Obr. 2: Globálna and difúzna radiácia pre Bratislavu



Obr. 3: Solárna radiácia pre Bratislavu



Obr. 4: Výsledky simulácie čiernej kocky situovanej v Bratislave



Obr. 5: Poloha kontrolných bodov pre teplotu na povrchu pri čiernej kocke

		maxima	**35,6**	**44,1**	**93,2**	**45,5**	**87,6**	**81**	**85,1**
index	day-nr	time	ext	floor	roof	north	west	south	east
0	1	0000:00:00:00	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
1	1	0000:00:30:00	-0,6	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
2	1	0000:01:00:00	-0,6	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
3	1	0000:01:30:00	-0,8	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
4	1	0000:02:00:00	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9

Obr. 6: Maximálne teploty pre jednotlivé povrchy čiernej kocky

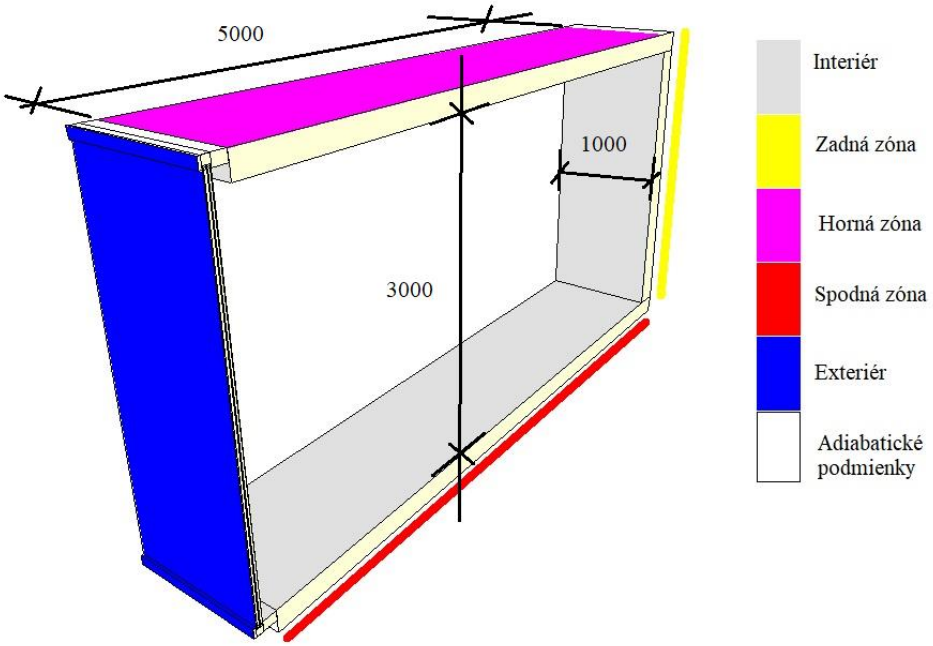
Za pomoci výsledkov simulácii čiernej kocky sa našiel deň v klimatickom roku, kedy sa očakáva najväčšia teplotná záťaž na fasádu. Vďaka týmto výsledkom sa mohla simulácia pre namodelovaný daný priestor sústrediť na samotný deň s maximálnou teplotnou záťažou.

Je dôležité poznamenať, že orientácia kocky bola kolmo na svetové strany, preto by bolo vhodné porovnať v rámci ďalšej štúdie inú orientáciu.

1.2 Simulácia priestoru a vstupné údaje

Referenčná miestnosť bola zo všetkých strán ohraničená železobetónovou konštrukciou a z jednej strany s presklenou fasádou z trojskla. Táto fasáda bola orientovaná na západ, pretože počiatočná

simulácia naznačovala, že najvyššie tepelné zaťaženie bolo sústredené na plochu orientovanú na západ. Predpokladá sa, že miestnosť je ohraničená ďalšími miestnosťami, ktoré vstupujú do simulácie v rámci okrajových podmienok a preto sa jednotlivé miestnosti rozdelili do zón, ktoré sú znázornené na obr. 7. Referenčný priestor bol modelovaný so zámerným zjednodušením pre účely porovnania.



Obr. 7: Model miestnosti a okrajové podmienky

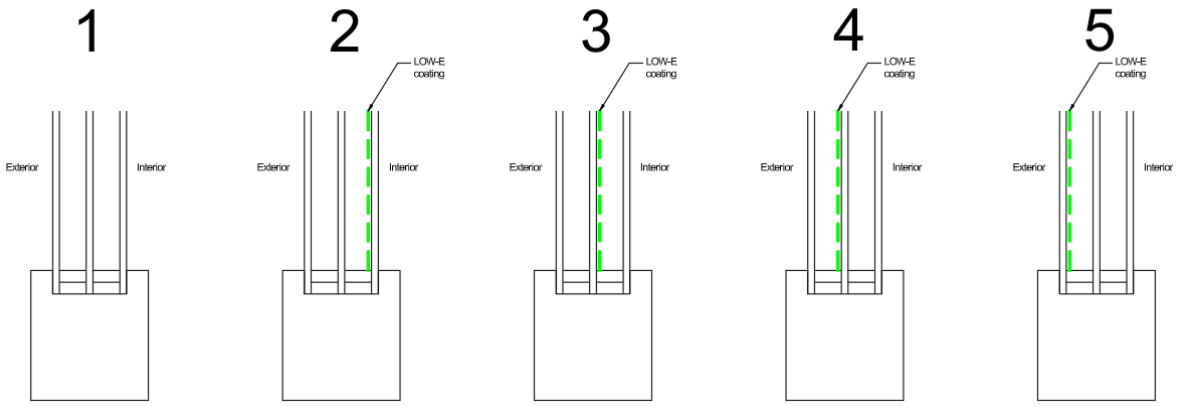
Model má vnútorné rozmery 5 metrov do hĺbky a svetlá výška je 3 metre. Pre letné teplotné podmienky bol použitý *celkový súčiniteľ prestupu tepla* 13,5 W/(m^2 .K). Všetky materiály použité v simulácii boli prevzaté z knižnice Voltra, ktorá obsahuje hodnoty špecifikované v norme ISO 10456. Infračervená emisivita je 0,9 pre všetky materiály okrem skla, pre ktoré bola použitá hodnota 0,837 (EN 673) [1]. Pre nízkoemisný náter aplikovaný na rôznych miestach bola použitá hodnota $\varepsilon = 0{,}05$. Všetky materiály pre slnečné žiarenie okrem skla boli modelované ako nepriehľadné, kde $\tau s = 0$, navyše všetkým materiálom okrem zasklenia bol priradený absorpčný faktor $\alpha s = 0{,}5$.

Col.		Type	CEN-rule	Name	Pat.	λ [W/mK]	ε [-]	N [kg/m3]	c [J/kgK]	? [°C]	h [W/m2K]	q [W/m2]	?a [°C]	hc [W/m2K]	Pc [W]	?r [°C]	C1	C2	C3	Sun	Ns [-]	τs [-]
1		BC_SIMPL	NIHIL	adiabatic						0.0	0.00	0								NO		
2		BC_SIMPL	NIHIL	outdoors						T01	13.50	0								YES		
4		BC_SIMPL	NIHIL	lower zone						20.0	7.70	0								NO		
6		BC_SIMPL	NIHIL	upper zone						20.0	7.70	0								NO		
7		BC_SIMPL	NIHIL	back zone						20.0	7.70	0								NO		
8		MATERIAL		aluminium		160.000	0.90	2800.0	880.0												0.00	0.00
16		MATERIAL		concrete, reinf. (1% steel)		2.300	0.90	2300.0	1000.0												0.50	0.00
28		MATERIAL		brickwork		0.600	0.90	1200.0	850.0												0.50	0.00
60		MATERIAL		frame conductive part		100.000	0.90	500.0	1000.0												0.50	0.00
61		MATERIAL		frame thermal break part		0.300	0.90	200.0	1000.0												0.50	0.00
62		MATERIAL		silicone, pure		0.350	0.90	1200.0	1000.0												0.50	0.00
66		MATERIAL		glass 1a (BC)		1.000	0.84	2500.0	750.0												R01	0.84
82		MATERIAL		glass 1b (CD)		1.000	0.10	2500.0	750.0												0.07	0.84
98		MATERIAL		glass 2a (FG)		1.000	0.84	2500.0	750.0												0.07	0.84
99		MATERIAL		glass 3a (FG)		1.000	0.84	2500.0	750.0												0.07	0.84
100		MATERIAL		glass 3b (FG)		1.000	0.84	2500.0	750.0												0.07	0.84
114		MATERIAL		glass 2b (FG)		1.000	0.84	2500.0	750.0												0.07	0.85
240		BC_FREE	NIHIL	room				1.2	1005.0			0		2.50	0							
243		TRANSMAT		argon cavity		0.017		1.2	1005.0													
244		TRANSMAT		dsad		0.017		1.2	1005.0													

Obr. 8: Vstupné údaje

1.3 Varianty zasklení

Zasklenie bolo modelované ako izolačné trojsklo pozostávajúce z troch sklenených tabúľ oddelených 16 mm vzduchovými medzerami. Pre účely tejto štúdie bol za postačujúci považovaný zjednodušený model zasklenia. Celkovo bolo porovnaných päť variantov, čo zodpovedá piatim simuláciám. Prvý variant používal zasklenie bez nízkoemisnej vrstvy, zatiaľ čo ostatné varianty obsahovali vrstvu v rôznych polohách v zasklenej jednotke (pozri obr. 9).



Obr. 9: Varianty zasklení

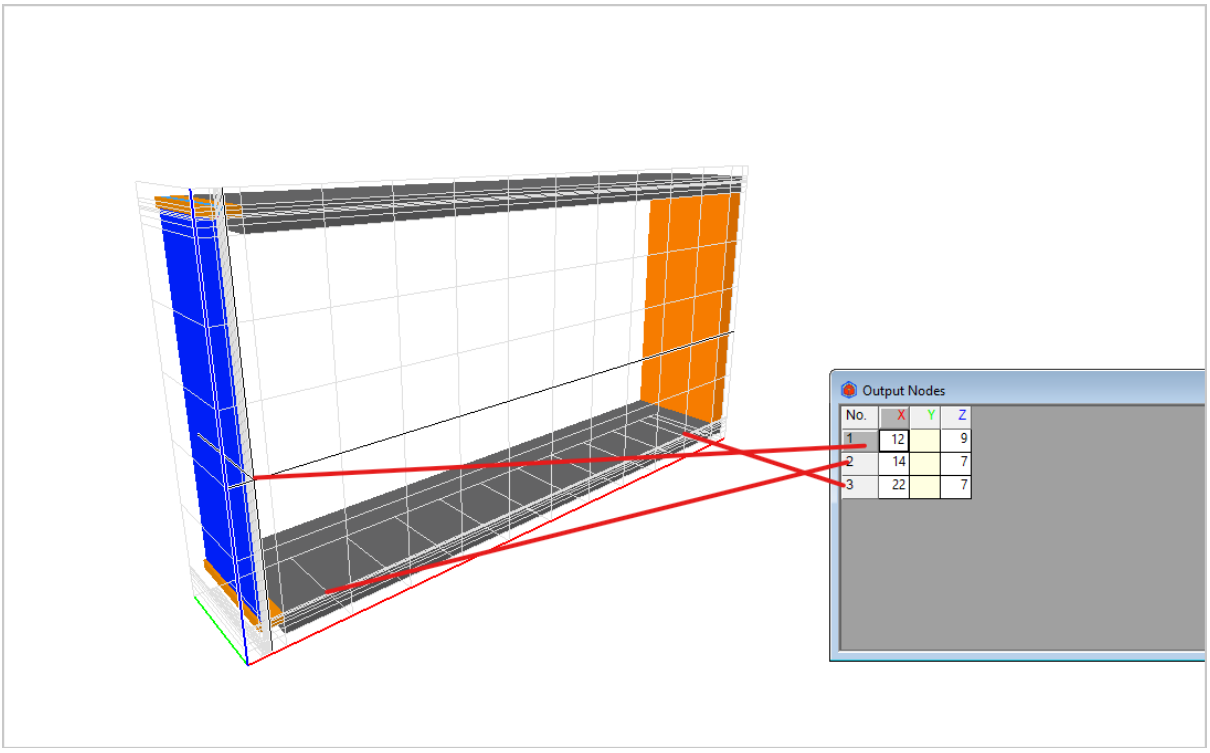
1.4 Nastavenie okrajových podmienok

Pre tento model boli použité rovnaké funkcie klimatických údajov, aké sa použili v simulácii čiernej kocky. Štúdia bola vykonaná pre lokalitu Bratislava.

Simulácia bola nakonfigurovaná s časovým krokom 10 minút, čo pokrýva 1 celý deň, zatiaľ čo celkový výpočet v programe Volta bol 3 dni. Na základe predchádzajúcej simulácie bolo identifikované maximálne tepelné zaťaženie fasády, čo prispelo k určeniu presného kalendárneho dňa s najvyšším namáhaním. Simulácia je preto nastavená na 205. deň roka zodpovedajúci 24. júlu.

Na zaznamenávanie hodnôt povrchovej teploty v 10-minútových intervaloch počas celého dňa boli definované tri meracie body. Prvý bod sa nachádzal v jednej tretine výšky miestnosti na vnútornej strane zasklenia. Druhý bod bol umiestnený na povrchu podlahy, kde sa očakával silný nárast teploty. Tretí bod bol priradený k zadnej časti miestnosti na podlahe.

Výsledné údaje zahŕňajú 3 vybrané uzly vrátane povrchov a hodnôt vonkajšej a vnútornej teploty (pozri obr. 10).



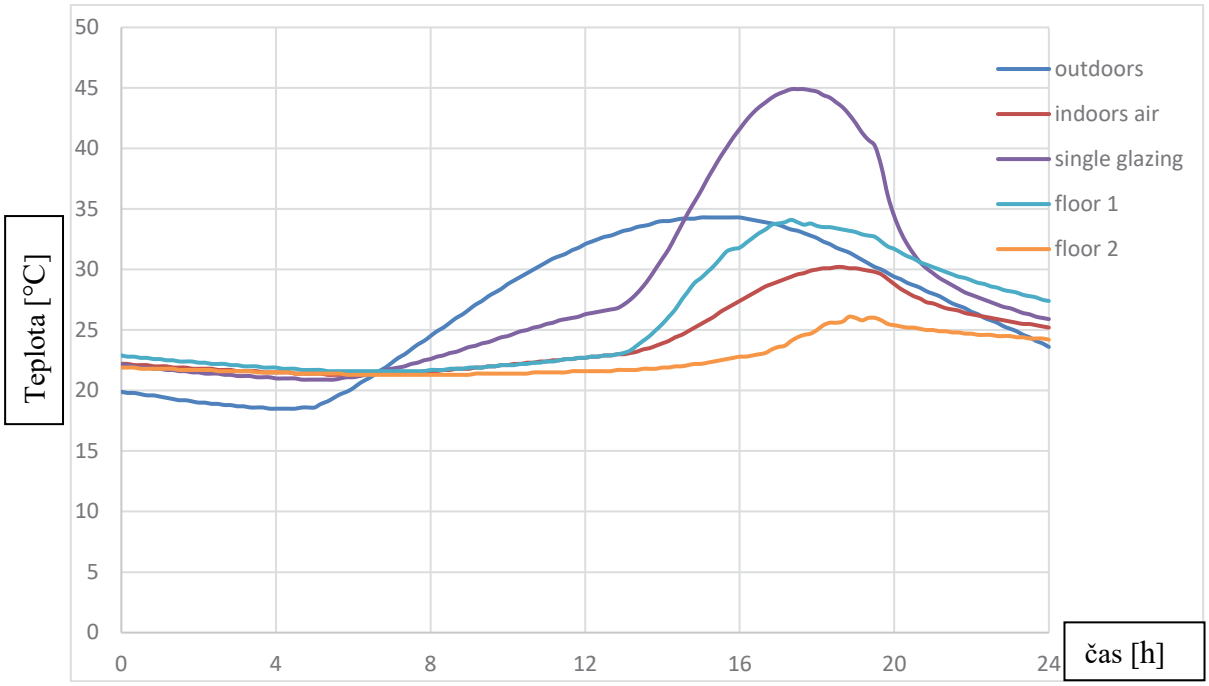
Obr. 10: Merané body

Simulácie boli vykonané v tomto poradí: prvý scenár modeloval zasklenie bez nízkoemisnej vrstvy. Tri ďalšie simulácie boli vykonané na rôznych miestach v zasklení. Cieľom tejto simulácie bolo študovať prehrievanie a vplyv umiestnenia nízkoemisnej vrstvy na teplotu vnútorného priestoru. To znamená, že vplyvy na konštrukciu v zimnom období neboli v tejto analýze zohľadnené.

2. Výsledky simulácií

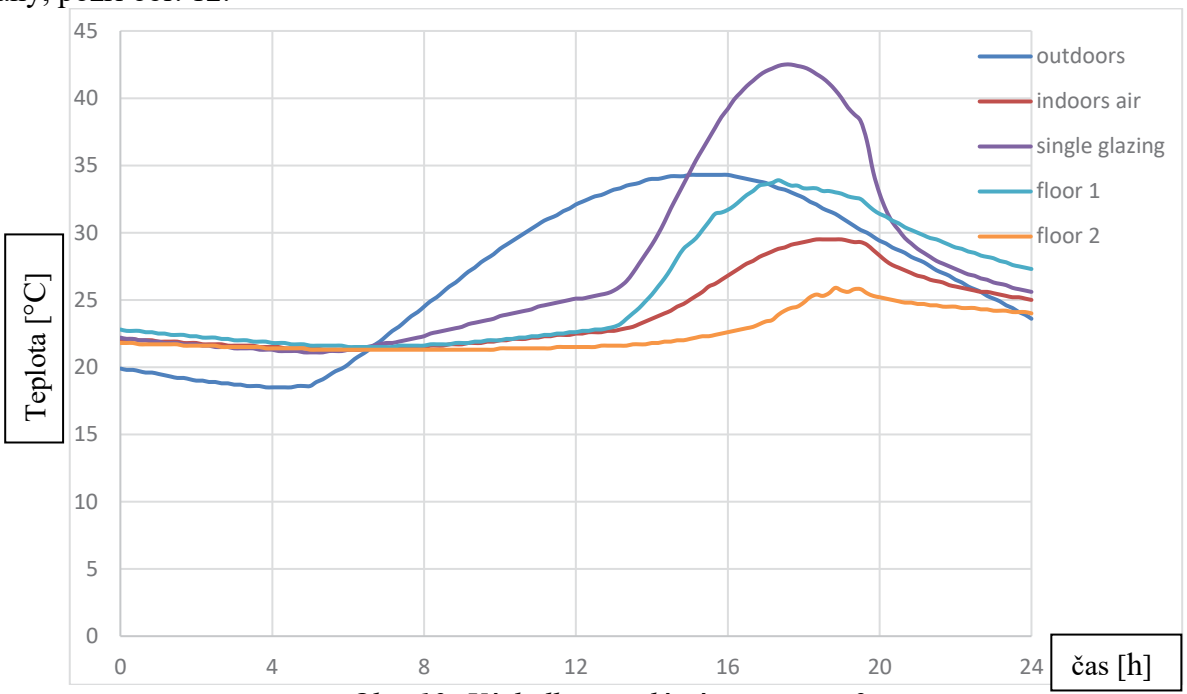
Porovnaných bolo celkovo 5 simulácií, z ktorých prvá bola bez nízkoemisnej vrstvy. Cieľom bolo posúdiť výhody alebo nevýhody nízkoemisnej vrstvy v konečnom hodnotení ako prvku zasklenia. Maximálna teplota exteriéru dosiahla 34,3 °C, zatiaľ čo teplota interiéru bola 30,2 °C, na povrchu zasklenia z interiérovej strany bola nameraná hodnota 44,9 °C, na povrchu podlahy pri fasáde bola maximálna teplota 34,1 °C a v zadnej časti miestnosti sa maximálna teplota pohybovala okolo 26,1 °C (pozri obr. 11).

Vo všetkých piatich simuláciách sa menila iba prítomnosť nízkoemisnej vrstvy, zatiaľ čo všetky ostatné aspekty vrátane okrajových podmienok zostali nezmenené.



Obr. 11: Výsledky simulácií varianta č.1

V prípade simulácie č. 2 bola nízkoemisná vrstva umiestnená priamo za zasklením z vnútornej strany, pozri obr. 12.

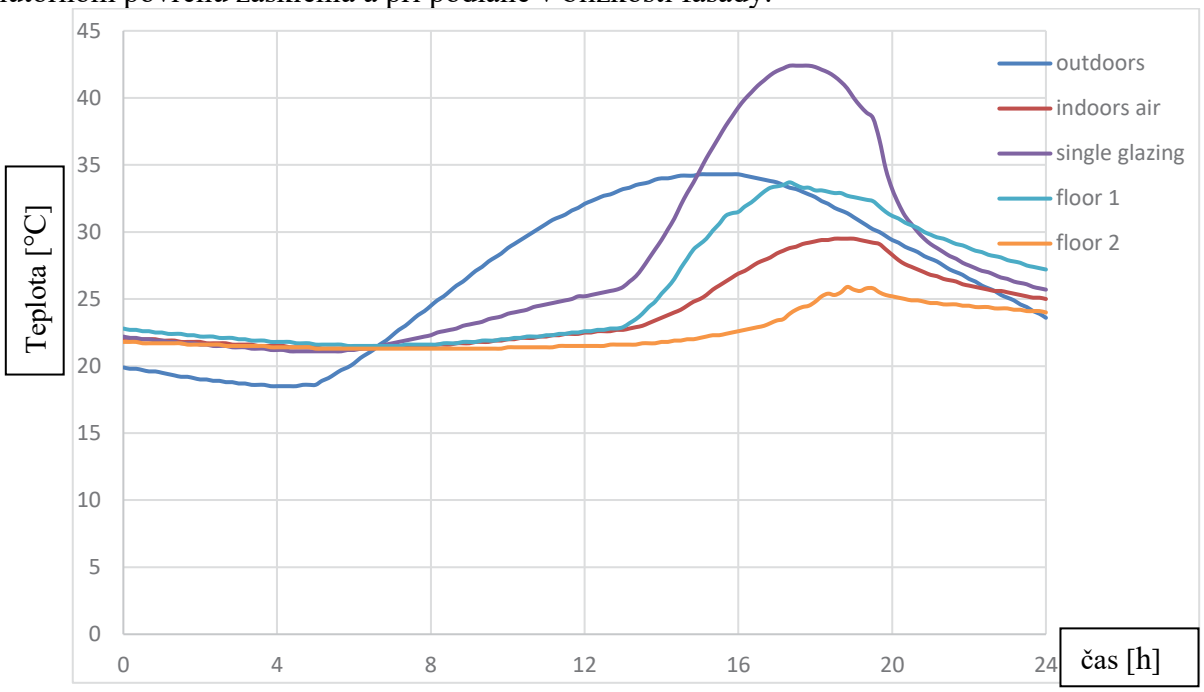


Obr. 12: Výsledky simulácií varianta č.2

Z tohto grafu je možné pozorovať, že teplota na povrchu vnútorného skla klesla v maximálnych hodnotách. S pridaním nízkoemisnej vrstvy klesla hodnota na maximálnu teplotu interiéru na 29,5 °C, čo predstavuje zníženie o 0,7 °C. Výrazný pokles na vnútornom povrchu zasklenia sa pohyboval okolo maximálnej teploty 42,5 °C, čo predstavuje najvýznamnejšie zníženie o 2,4 °C v porovnaní so simuláciou bez nízkoemisnej vrstvy. Pri zohľadnení podlahy sa teplota znížila len nepatrne, o 0,2 °C.

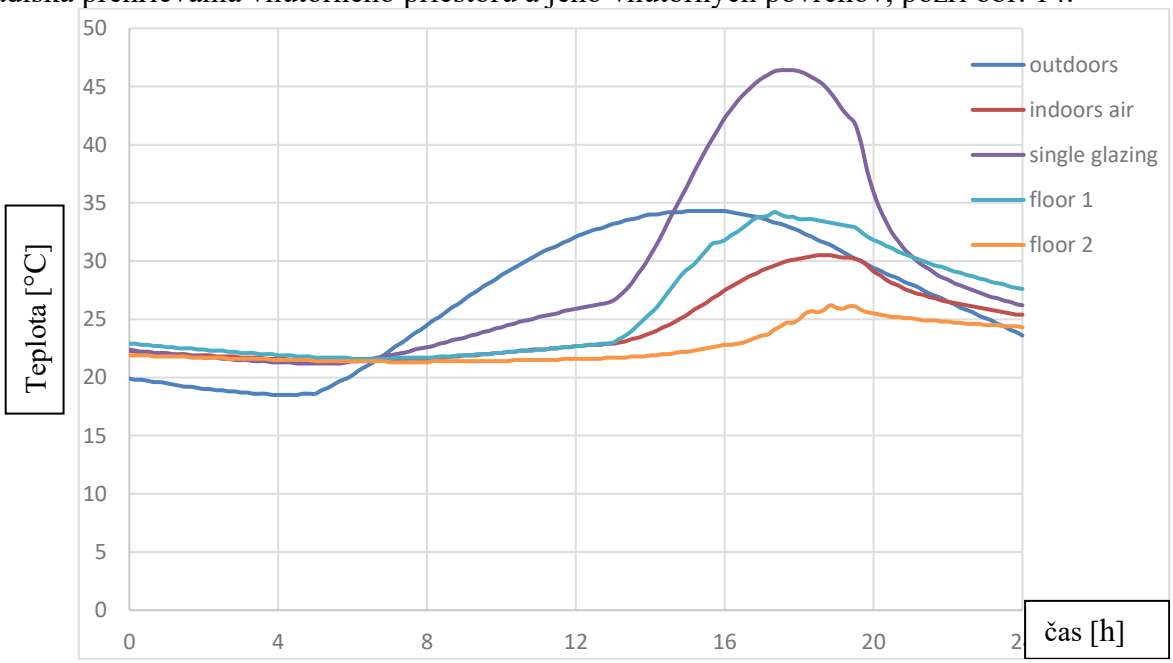
V simulácii č. 3 bola nízkoemisná vrstva posunutá iba o jednu pozíciu bližšie k exteriéru, pozri obr. 13. Zmena teploty vnútorného povrchu zasklenia bola zanedbateľná. Takmer všetky hodnoty sú

identické s hodnotami v simulácii č. 2, pričom sa pozorovalo len mierne zníženie teploty na vnútornom povrchu zasklenia a pri podlahe v blízkosti fasády.



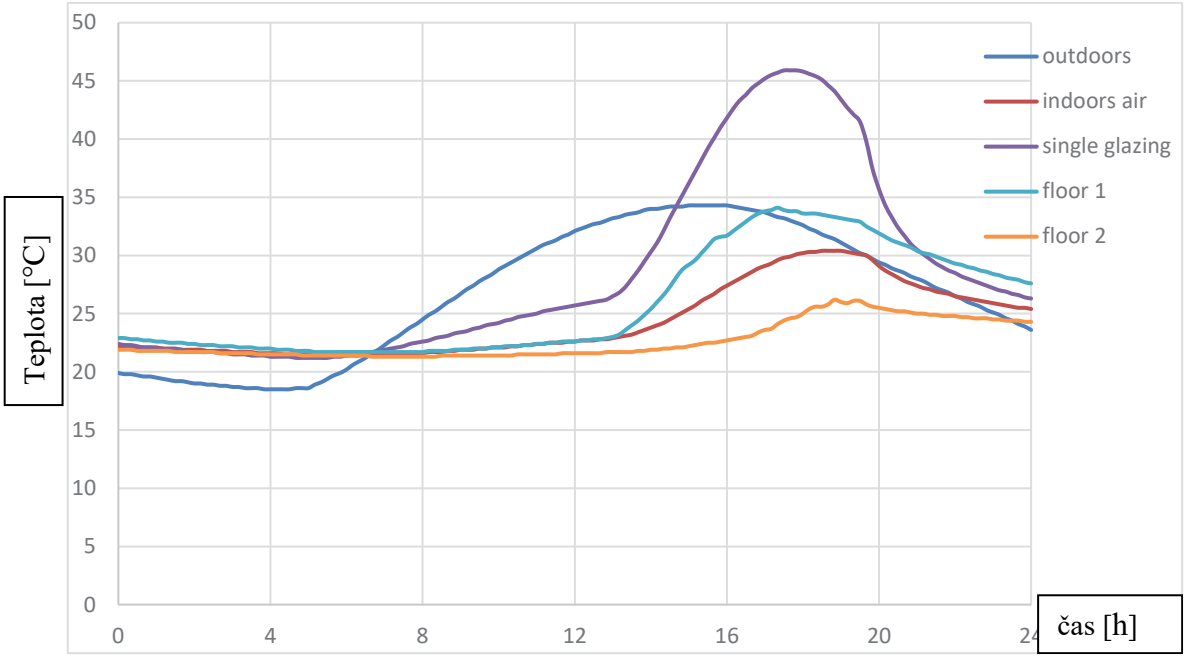
Obr. 13: Výsledky simulácií varianta č.3

V simulácii č. 4 bola nízkoemisná vrstva posunutá o jednu pozíciu smerom k exteriéru. V prípade tejto simulácie výsledok naznačuje zvýšenie vnútornej teploty o 30,5 °C v porovnaní s predchádzajúcimi variantmi. Výrazný nárast bol pozorovaný aj v meranom bode, ktorý sa nachádza na vnútornom zasklenom povrchu, kde teplota dosiahla 46,4 °C. Podobne sa zvýšila aj teplota povrchu podlahy. Tento variant má najhoršie výsledky spomedzi všetkých testovaných scenárov z hľadiska prehrievania vnútorného priestoru a jeho vnútorných povrchov, pozri obr. 14.



Obr. 14: Výsledky simulácií varianta č.4

V poslednej konfigurácii, simulácii č. 5, bola nízkoemisná vrstva aplikovaná na vnútornú časť zasklenia blízko vonkajšej strany. Výsledky získané z tejto simulácie vykazujú podobnosť s výsledkami z predchádzajúceho prípadu, hoci s mierne zlepšeným výsledkom (pozri obr. 15).



Obr. 13: Výsledky simulácií varianta č.5

3. Záver

Nízkoemisné vrstvy predstavujú kľúčovú technológiu v modernej architektúre. Ich prínos spočíva nielen v znižovaní tepelných strát, ale aj v regulácii solárnych ziskov, čím ovplyvňujú riziko prehrievania interiéru. Súčasný výskum sa zameriava na optimalizáciu viacvrstvových zasklievacích systémov, ktoré súčasne dosahujú vysokú priepustnosť viditeľného svetla, nízke hodnoty U a vhodne vyváženú tepelnú izoláciu (SHGC) prispôsobenú miestnym klimatickým podmienkam.

Cieľom tohto článku bolo zdôrazniť vhodnosť aplikácie nízkoemisnej vrstvy na presklené fasády v priestoroch bez klimatizácie. Výsledky naznačujú, že takéto nátery sú relevantnejšie pre klimatizované priestory, kde aj malé teplotné rozdiely môžu výrazne ovplyvniť účinnosť a pomôcť znížiť náklady na chladenie. Aj keď výsledky v grafoch sa zdajú rovnaké na prvý pohľad, rozdiely tam sú, preto by sa v ďalšej štúdii mala zohľadniť aj odrazivá zložka zasklenia, a absorbčný faktor.

Štúdia ďalej skúmala, či samotná poloha nízkoemisnej vrstvy môže podstatne znížiť prehrievanie bez zohľadnenia iných vlastností zasklenia. Hoci použitie nízkoemisnej vrstvy môže znížiť vnútorné teploty, toto zníženie nie je dostatočné na to, aby eliminovalo potrebu chladiacich systémov. Preto by sa v budúcich simuláciách mali preskúmať ďalšie kombinácie vlastností zasklenia a integrácia zasklenia s tieniacimi zariadeniami.

Literatúra

[1] PHYSIBEL: Knowledge Base: VOLTRA Manual. [online]. Dostupné na: [https://portal.physibel.be/knowledge#m6-voltra-manual]

[2] CHMÚRNY I. - TOMAŠOVIČ P. - HRAŠKA J.: Fyzika vnútorného prostredia budov. Vybrané kapitoly základov tepelnej ochrany budov, stavebnej akustiky, denného osvetlenia a insolácie budov. Bratislava: STU Bratislava 2013, s. 394, ISBN 978-80-227-3917-7;

[3] https://www.agc-yourglass.com/configurator/app/request;

[4] VITRO ARCHITECTURAL GLASS: How Low-E Glass Works. Vitro Glass Knowledge Center, 2023. Dostupné na: [https://www.vitroglazings.com/low-e]

[5] EN ISO 13792: 2005. Thermal performance of buildings – Calculation of internal temperatures of a room in summer without mechanical cooling – Simplified methods;

[6] AMIRKHANI, A. – SODAGAR, B. – MILLS, G. – SWAN, W.: Impact of Low-E Window Films on Energy Consumption and Occupant Comfort in Hotels. Energies, 2019, roč. 12, č. 19, s. 3704. DOI: [https://doi.org/10.3390/en12193704]

[7] GLÄSER, H. J.: Architectural and Automotive Coatings on Glass by Large Area Magnetron Sputtering. Applied Optics, 1993, roč. 32, č. 31, s. 5429–5448. DOI: [https://doi.org/10.1364/AO.32.005429]

[8] ISO 10456: Building materials and products – Hygrothermal properties.

[9] EN ISO 13792:2005: Thermal performance of buildings – Calculation of internal temperatures of a room in summer without mechanical cooling – Simplified methods.

[10] JELLE, B. P.: Low-emissivity Materials for Building Applications: A State-of-the-Art Review and Future Research Perspectives. Energy and Buildings, 2015, roč. 96, s. 329–356. DOI: [https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.024]

[11] KUCZYŃSKI, T. – FEDORCZAK-CISAK, M. – KOSINSKI, P.: The Effect of Thermal Mass, Night Ventilation and Window Parameters on Summer Overheating in Residential Buildings. Energies, 2021, roč.14, č. 14, s. 4243. DOI: [https://doi.org/10.3390/en14144243]

[12] SOROOSHNIA, S. – KHOSHBAKHT, M. – AGHAIE, M.: A Novel Approach for Optimized Design of Low-E Windows Using Energy and Comfort Criteria. Building and Environment, 2025, roč. 251, s. 111021. DOI: [https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.111021]

[13] VENKITESWARAN, V. K. – ZALEJSKA-JONSSON, A. – LIND, H.: Comparative Study of Passive Methods for Reducing Cooling Demand in Residential Buildings in Tropical Climates. Energy Procedia, 2017, roč. 132, s. 861–866. DOI: [https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.708]

Tomáš Hakszer[1]
Program of study: Theory and Structures of Buildings D-TKPS4, 3. year

A COMPARATIVE ANALYSIS OF ELECTROCHROMIC GLAZING AND DYNAMIC BLINDS UNDER REALISTIC, LLM-GENERATED CONTROL SCHEDULES

POROVNÁVACIA ANALÝZA ELEKTROCHROMATICKÉHO ZASKLENIA A DYNAMICKÝCH TIENIACICH PRVKOV PRI POUŽITÍ REALISTICKÝCH SCENÁROV OVLÁDANIA VYGENEROVANÝCH POMOCOU LLM

Abstract
The performance of dynamic façades is often overestimated in simulations that neglect realistic operational delays. This study quantifies the impact of these delays by comparing electrochromic (EC) glazing against two types of external blind systems (low and high – transmittance) in a simulated office. A novel methodology was used where a Large Language Model (LLM) generated five annual control schedules representing user responses ranging from ideal to significantly delayed. The results demonstrate that control delays substantially degrade performance, reducing Daylight Autonomy (DA) by up to 22.4% and increasing lighting energy demand by up to 14.9%. A clear trade-off emerged: the low-transmittance blind provided excellent glare control but poor daylighting, while the EC and high-transmittance systems offered superior daylighting at the cost of visual discomfort. This research demonstrates the critical role of control strategies and introduces an effective LLM-based approach for generating realistic simulation inputs.

Keywords
Dynamic Façades; Daylight Simulation; Occupant Behavior; Large Language Model (LLM)

1. Introduction

Daylight is widely recognized as an essential element in building design due to its profound benefits for human well-being, performance, and indoor environmental quality [1,2]. Proper daylighting reduces artificial lighting energy while improving productivity, occupant satisfaction, and connection to nature [3,4]. Ensuring visual comfort, alongside adequate light levels, is therefore a critical requirement for fostering healthy and productive indoor environments [5].

The building façade, especially its glazing system, acts as the primary interface between the indoor and outdoor environments, fundamentally shaping the spectral power distribution, availability and quality of daylight within a space. While modern architectural trends often favour large, glazed surfaces to maximise daylight and exterior views, this approach frequently introduces challenges such as discomfort glare and potential overheating [6]. To address these challenges, dynamic façade systems such as electrochromic (EC) glazing and dynamic blinds have emerged as advanced solutions capable of modulating light and solar radiation [7,8,9]. These façade systems adapt their optical properties in response to external stimuli or occupant needs, allowing for controlled light penetration and glare mitigation [8,10]. EC glazing dynamically tunes its optical properties, offering variable

[1] Tomáš Hakszer, Ing., Faculty of Civil Engineering STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

light transmittance through multiple tint states, from clear to fully tinted, thereby controlling the luminous environment and preserving outdoor views [11,12,13]. Similarly, dynamic blind systems provide flexible control over incoming light, effectively reducing glare and managing solar gains [14,15].

Despite the substantial potential of dynamic façade systems to optimise indoor environmental quality and energy efficiency, their real-world performance often falls short of idealised projections [16]. This discrepancy is often attributed to the complex and suboptimal ways occupants interact with shading devices [17,18]. Manual operation of shading devices is often suboptimal [19]. Occupants frequently lower blinds to address immediate glare but may not raise them after the glare source is gone, thereby reducing valuable daylight and views [20,21]. The complexity of human interaction with dynamic systems is a known challenge, with many automated systems falling short of occupant expectations [14,22]. For example, if a space that maximises daylight transmission for electrical lighting energy reduction results in visual discomfort, it can lead to constant use of interior shading devices or ad hoc modifications, significantly altering the original design intent and compromising performance [17]. Therefore, to accurately predict system performance, simulations must include realistic models of occupant behavior [5,17]. A critical aspect often overlooked in simulations is the delayed response from both automated systems and occupants, which can significantly impact daylight availability and visual comfort [13,22,23,24].

Modelling these varied and complex user-response delays presents a methodological challenge. Generating multiple nuanced, time-based control schedules manually is a laborious process. To address this, our study leverages a Large Language Model (LLM) as a novel computational tool. By programmatically modifying a baseline control schedule, the LLM allows for the rapid generation of multiple, complex scenarios that simulate realistic operational delays, enabling a more robust sensitivity analysis. The advent of LLMs such as ChatGPT and other AI-enabled platforms, including Google Gemini, has introduced a new dimension to scientific research and communication. Rapid advancements in Artificial intelligence (AI) and LLMs are enabling more efficient and sophisticated methods for tackling complex challenges in the built environment. These models offer capabilities that significantly assist researchers and designers across all stages, paving the way for more integrated design and operational solutions [25,26,27].

This study tests the hypothesis that realistic operational delays in dynamic façade control significantly degrade both daylighting performance and energy efficiency, and that this degradation can be effectively quantified using LLM-generated control schedules.

2. Methodology

This study quantitatively compares the daylight and visual comfort performance of EC glazing against a standard triple-pane glazing unit with two types of external blinds. The analysis is performed under five different control schedules that simulate realistic user delays, addressing the common discrepancy between idealized simulations and real-world operation. Furthermore, this study demonstrates a novel application of LLMs for generating these complex simulation input schedules.

The case study is based on a representative office room on the 7th floor of the Slovak University of Technology's Faculty of Civil Engineering high-rise building in Bratislava, Slovakia (48.15° N, 17.11° E). The analysed office has dimensions of 2.75 m x 5.76 m, and its windows have a southwest orientation. A detailed 3D model of the building and its immediate urban context was created using Rhinoceros V8 [28] to accurately account for external obstructions. Daylighting and glare simulations were performed using the validated simulation tool ClimateStudio V2.2 [29]. The optical properties for the façade systems were sourced from the ClimateStudio material library, which includes measured data for fabric shades from LBNL's Complex Glazing Database (CGDB) [30] and proprietary electrochromic systems like SageGlass [31]. A model for the office room on the 7th floor and a model of the building and its immediate urban context are shown in Fig. 1. Climate data for the

building's location were incorporated through a Typical Meteorological Year (TMY) weather file generated by Meteonorm V8.0 software [32,33], which provided hourly data for the annual simulations.

To assess performance, a comparative analysis was structured around 15 distinct simulation variants. These variants were derived from three unique façade systems, each subjected to five different control schedules designed to simulate a range of user behaviours from ideal to significantly delayed. The three core façade systems investigated were:

- EC glazing system (based on SageGlass data [31]) with four distinct tint states, from clear to fully tinted (VLT_{tint0} = 60%, VLT_{tint1} = 17%, VLT_{tint2} = 5%, VLT_{tint3} = 0.9%).
- Standard triple-pane glazing unit (VLT = 64.2%) combined with an external fabric roller shade (VLT = 1%) classified by a glare control classification according the European Standard EN 14501 [34] as providing "Very Good Glare Control".
- Standard triple-pane glazing unit (VLT = 64.2%) combined with an external fabric roller shade (VLT = 7%) classified by a glare control classification according the European Standard EN 14501 [34] as providing "Little Glare Control".

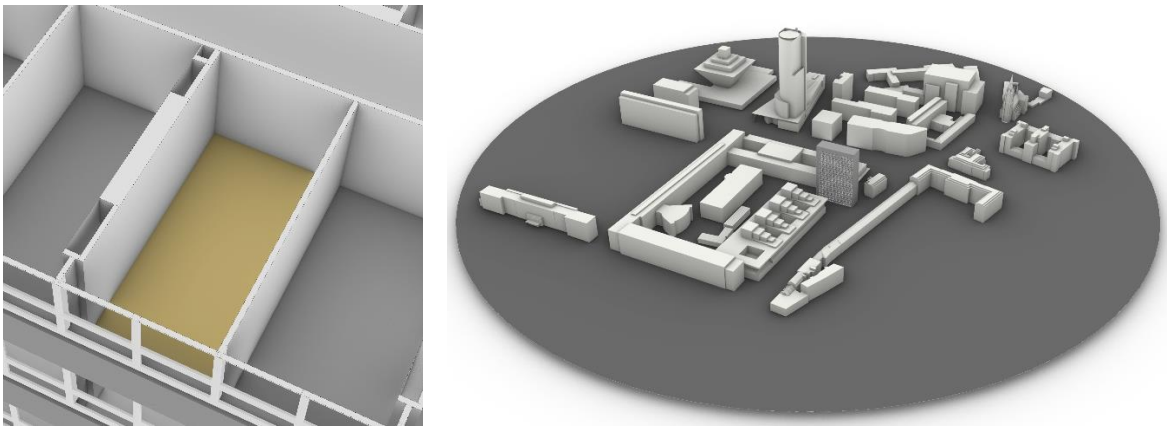


Fig. 1 – 3D Model of the evaluated office (left) and the 3D model of the Faculty of Civil Engineering building and its immediate urban context (right).

The baseline schedule (SCH1) was first established through an annual simulation of representative office room with EC glazing system and Standard triple-pane glazing unit combined with an external dynamic blind system using the IES-NA LM-83 standard [35]. In these simulations the shading system is activated (blinds close or EC glass tints) when direct horizontal illuminance exceeds 1000 lux on more than 2% of the interior sensor points. The system reverts to its most transparent state the instant this condition is no longer met. Recognizing that this immediate reversion is not typical of human behaviour, four additional schedules were created by programmatically modifying the baseline schedule. The baseline schedule (SCH1), an 8760-row CSV file, was provided to the Google Gemini 2.5 Pro LLM [36]. For SCH2, the model was prompted with the following instruction: *Analyse the attached CSV. For every instance where a value changes from a non-zero integer to zero, delay this change by one hour by keeping the previous value for an additional row. Apply this logic sequentially throughout the file*. Similar prompts were used to generate the 3-hour, random, and next-day delay schedules.

The five resulting control schedules were:

- SCH1 (Ideal/Sensor): The baseline IES-NA LM-83 [35] operation with instant lightening/reopening.
- SCH2 (1-hr Delay): Lightening/reopening is delayed by one additional hour.
- SCH3 (3-hr Delay): Lightening/reopening is delayed by three additional hours.

- SCH4 (Random Delay): Lightening/reopening is delayed by a random duration of 1, 2, or 3 hours. A consistent random seed was used across façade systems for comparability.
- SCH5 (Next Day Response): Lightening/reopening occurs on the following morning.

The schedules used for the simulations with the EC glazing system are shown in Fig. 2 and the schedules used for the external dynamic blind system are shown in Fig. 3. The occupancy schedule for the dynamic daylight simulations was set from 8:00 AM to 5:00 PM.

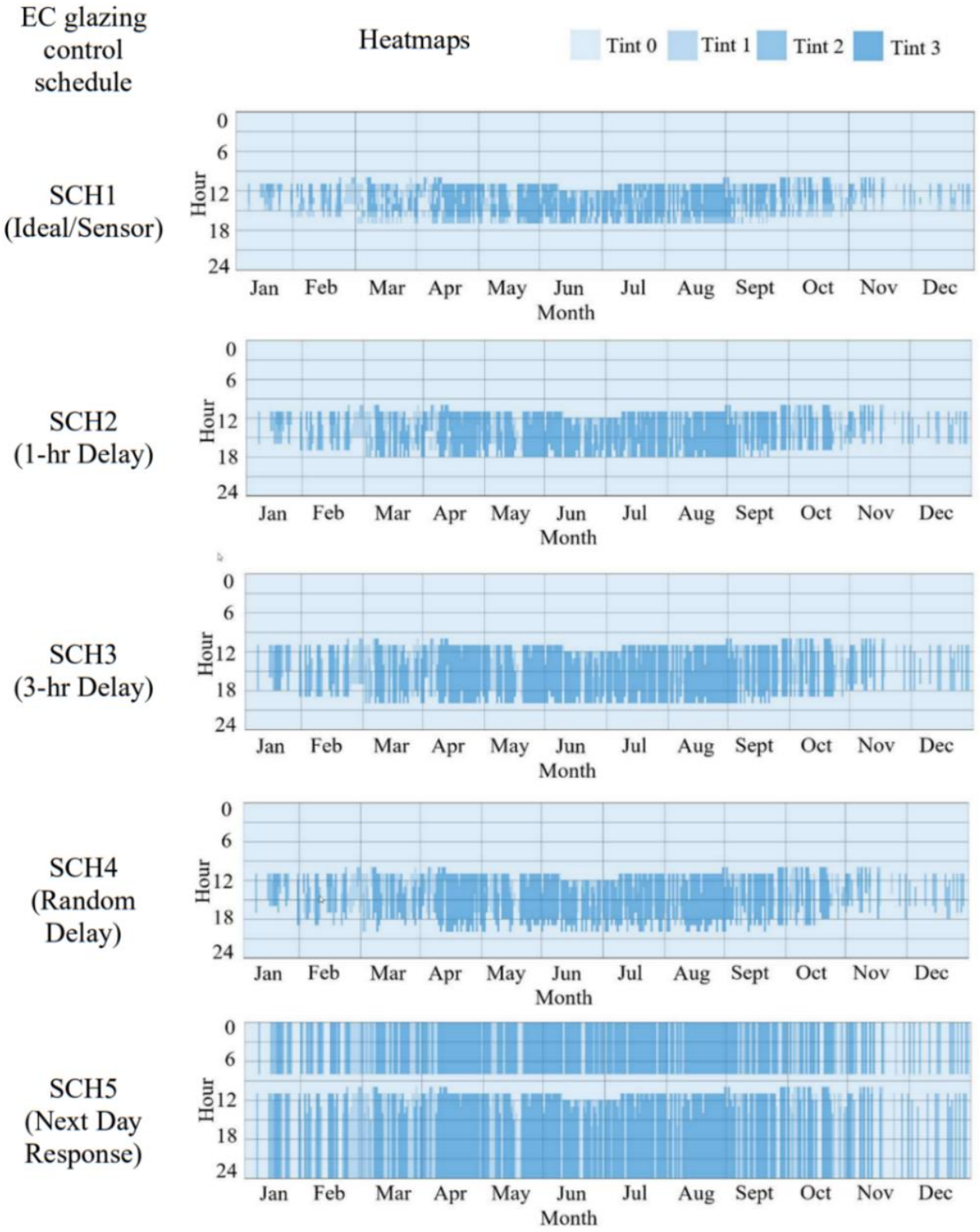


Fig. 2 – EC glazing control schedules.

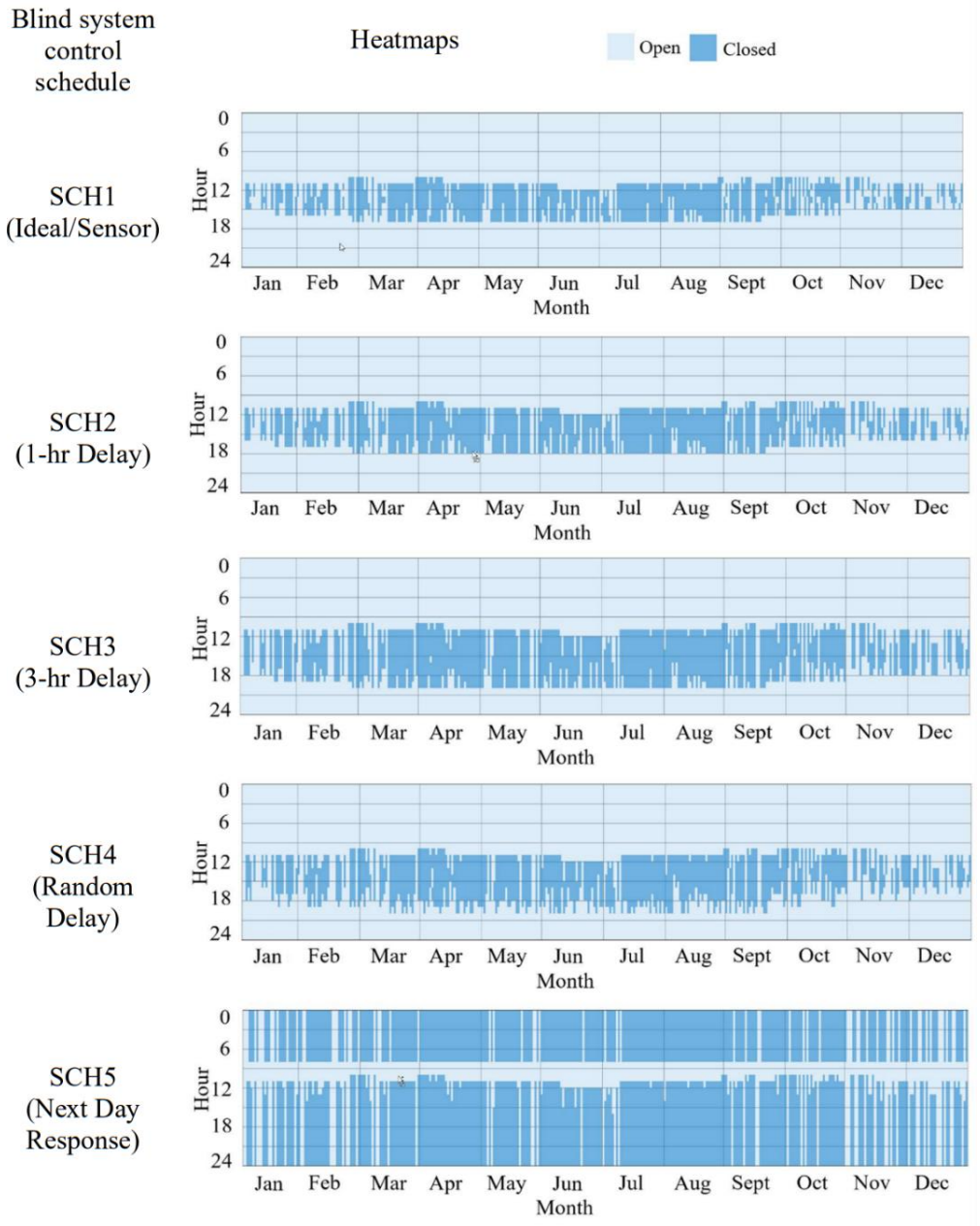


Fig. 3 – External dynamic blind system control schedules.

To compare the quantity and quality of daylight within the office space, the following dynamic metrics and analysis methods were selected:

- Daylight Glare Probability (DGP): A validated metric used to assess visual discomfort in daylit spaces. DGP is a hybrid metric that accounts for both the contrast of bright sources and the overall vertical eye illuminance [37,38,39,40]. The analysis focused on the frequency of "Intolerable Glare," defined as periods when the DGP value exceeds 0.45. According to the European standard EN 17037, glare is considered unacceptable if intolerable conditions occur for more than 5% of occupied hours [41]. DGP was evaluated for all 15 variants at two control points representing workstations located 1 m from the window, one with an east-facing and the other with a west-facing view direction (Fig. 4).
- Daylight Autonomy (DA): A climate-based metric that quantifies the percentage of occupied hours per year when a minimum illuminance threshold is met by daylight alone [3,42]. For this study, the illuminance threshold was set at 300 lux. DA was

calculated as the average value from a grid of sensor points placed on the work plane at a height of 0.85 m with a spacing of 0.25 x 0.25 m.

- Lighting Dependency (LD): This metric quantifies the reliance on electric lighting and is defined as the percentage of occupied hours when daylight is insufficient to meet the 300 lux threshold [15,43]. It was calculated for each variant as the inverse of DA [15]:

$$LD = 100\% - DA \quad (1)$$

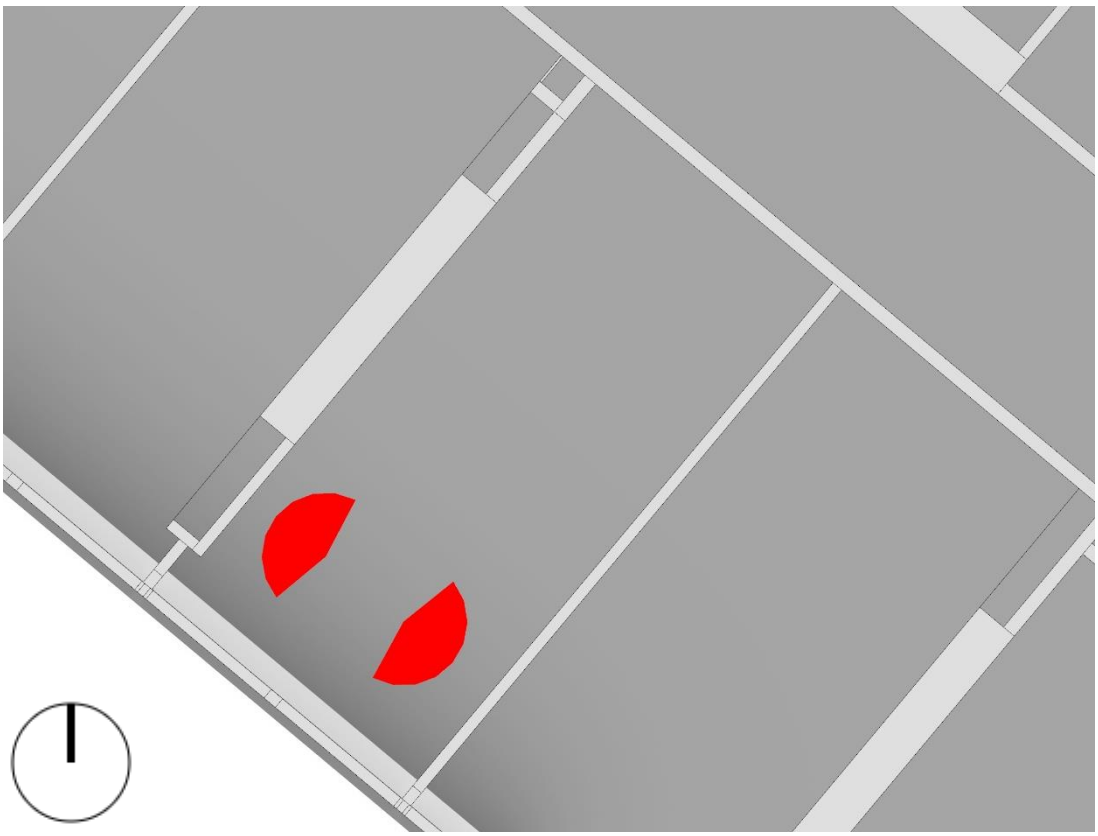


Fig. 4 –Location and view direction of the DGP control points.

The LD results were subsequently used to estimate the annual electrical energy consumption for lighting for each variant. The calculation was performed twice to reflect two different lighting technology scenarios; one based on older fluorescent technology and one on modern LED technology. The energy consumption (E) in Wh/m^2 was calculated using the formula [43]:

$$E = LD \times P_{installed} \times n_{hours} \quad (2)$$

The inputs for this calculation were:

- n_{hours} - Hours of usage: 2470 hours per year, as specified by the Slovak standard STN 73 0540-2, Z1+Z2, 2019 [44].
- $P_{installed}$ - Installed Power Density:
  - Scenario 1 - Fluorescent: A lighting power density of 15 W/m².
  - Scenario 2 - LED: A lighting power density of 6 W/m².

The $P_{installed}$ values were based on the technical standard EN 15193: Energy performance of buildings - Energy requirements for lighting [45].

3. Results

The annual simulation results for DA, LD and the estimated lighting energy consumption for all 15 variants are summarized in Table 1.

Tab. 1 Annual Daylight Performance and Estimated Lighting Energy Consumption by Façade System and Control Schedule.

Façade System	Control Schedule	Daylight Autonomy (DA) [%]	Lighting Dependency (LD) [%]	Energy Consumption (Fluorescent) [Wh/m²a]	Energy Consumption (LED) [Wh/m²a]
EC Glazing	SCH1	41.89	58.11	21531.43	8612.57
	SCH2	37.90	62.10	23008.78	9203.51
	SCH3	36.18	63.82	23645.11	9458.05
	SCH4	36.87	63.13	23388.67	9355.47
	SCH5	33.21	66.79	24747.37	9898.95
Triple-pane glazing with a blind system (VLT = 1%)	SCH1	32.65	67.35	24954.70	9981.88
	SCH2	29.81	70.19	26006.07	10402.43
	SCH3	28.53	71.47	26480.14	10592.06
	SCH4	29.13	70.87	26256.99	10502.79
	SCH5	25.35	74.65	27657.43	11062.97
Triple-pane glazing with a blind system (VLT = 7%)	SCH1	42.88	57.12	21164.18	8465.67
	SCH2	40.15	59.85	22174.79	8869.92
	SCH3	38.83	61.17	22661.96	9064.78
	SCH4	39.48	60.52	22422.73	8969.09
	SCH5	35.57	64.43	23870.83	9548.33

Fig. 5 illustrates the progressive degradation of DA across all façade systems as control delays increase from SCH1 to SCH5. The EC glazing system demonstrated a decrease from 41.89% under ideal sensor control (SCH1) to 33.21% with next-day response (SCH5), representing a 20.7% reduction. The triple-pane glazing with external blind system (VLT = 1%) exhibited the highest sensitivity to delays, with DA declining from 32.65% to 25.35%, a reduction of 22.4%. Conversely, the blind system with VLT = 7% demonstrated greater resilience, maintaining relatively higher DA values despite delays, with a reduction from 42.88% to 35.57%, a reduction of 17.0%.

As shown in Fig 5, the one-hour delay scenario (SCH2) resulted in immediate performance degradation across all systems, with DA reductions ranging from 6.4% to 9.5% relative to baseline. The three-hour delay (SCH3) and random delay (SCH4) scenarios produced comparable results, suggesting that stochastic user behavior within a 1–3-hour window yields similar aggregate performance to deterministic three-hour delays. The most severe impact occurred under SCH5, where the assumption of next-day adjustment resulted in DA reductions exceeding 20% for two of the three façade systems.

The corresponding LD values, inversely mirror the DA patterns, increasing from 57.12% to 64.43% for the blind system with VLT = 7% and from 67.35% to 74.65% for the VLT = 1% configuration. These values directly translate to increased reliance on artificial lighting during occupied hours.

The lighting energy consumption analysis reveals a direct correlation between control delays and increased energy demand across both lighting technologies. Fig. 6 presents the LED scenario, where the EC glazing system experienced an energy increase from 8,613 Wh/m²a (SCH1) to 9,899 Wh/m²a (SCH5), representing a 14.9% penalty. The blind system with VLT = 1% showed the highest absolute energy consumption, increasing from 9,982 to 11,063 Wh/m²a (+10.8%), while the VLT = 7% configuration demonstrated intermediate values, rising from 8,466 to 9,548 Wh/m²a (+12.8%).

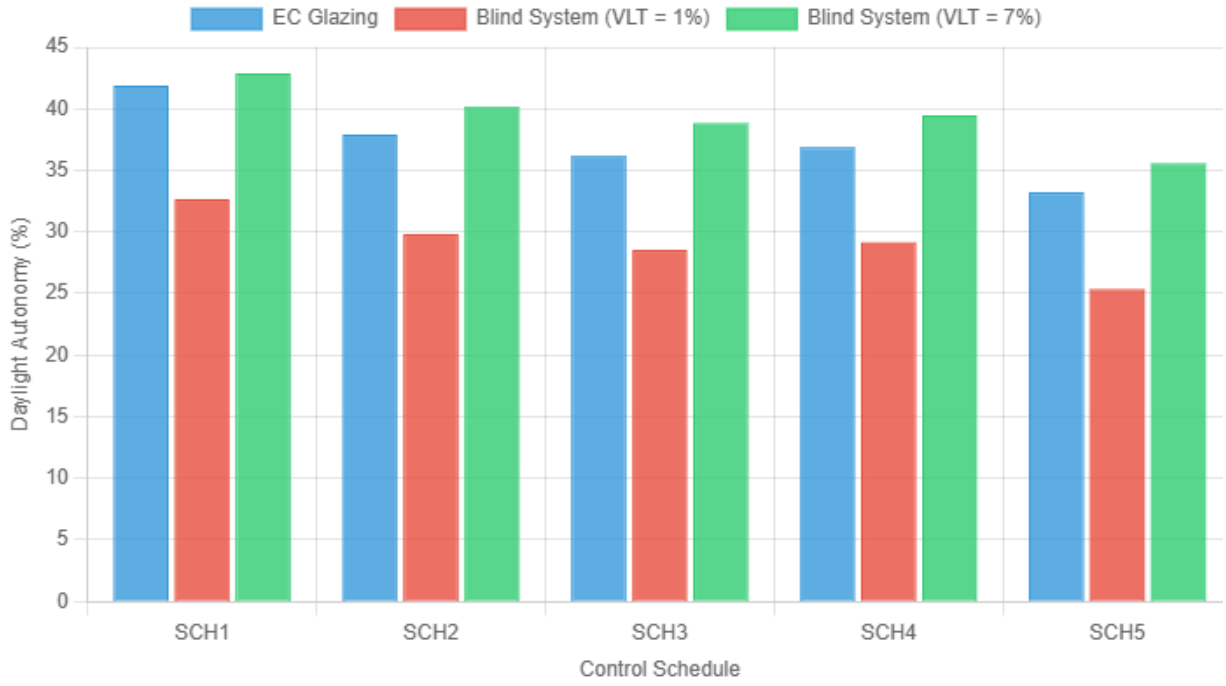


Fig. 5 –DA performance across control schedules for three façade systems.

For fluorescent lighting scenarios, illustrated in Fig. 7, the absolute energy consumption values were substantially higher, ranging from 21,164 to 27,657 Wh/m²a across all variants. The percentage increases mirror those observed in the LED scenario: EC glazing increased by 14.9% (from 21,531 to 24,747 Wh/m²a), the blind system with VLT = 1% by 10.8% (from 24,955 to 27,657 Wh/m²a) and the VLT = 7% configuration by 12.8% (from 21,164 to 23,871 Wh/m²a). The parallel patterns visible in Fig. 6 and 7 confirm that control delays impose a technology-independent relative penalty, though the absolute magnitude scales with installed power density.

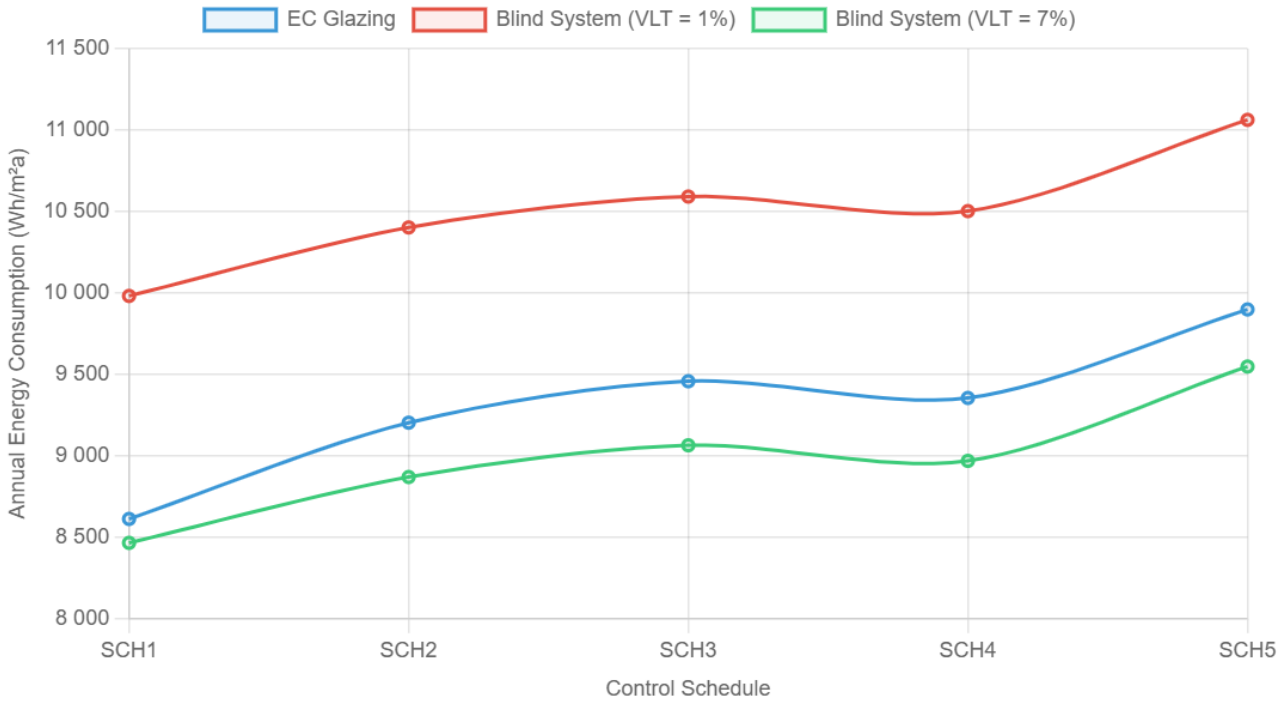


Fig. 6 – Annual lighting energy consumption (LED scenario) across control schedules.

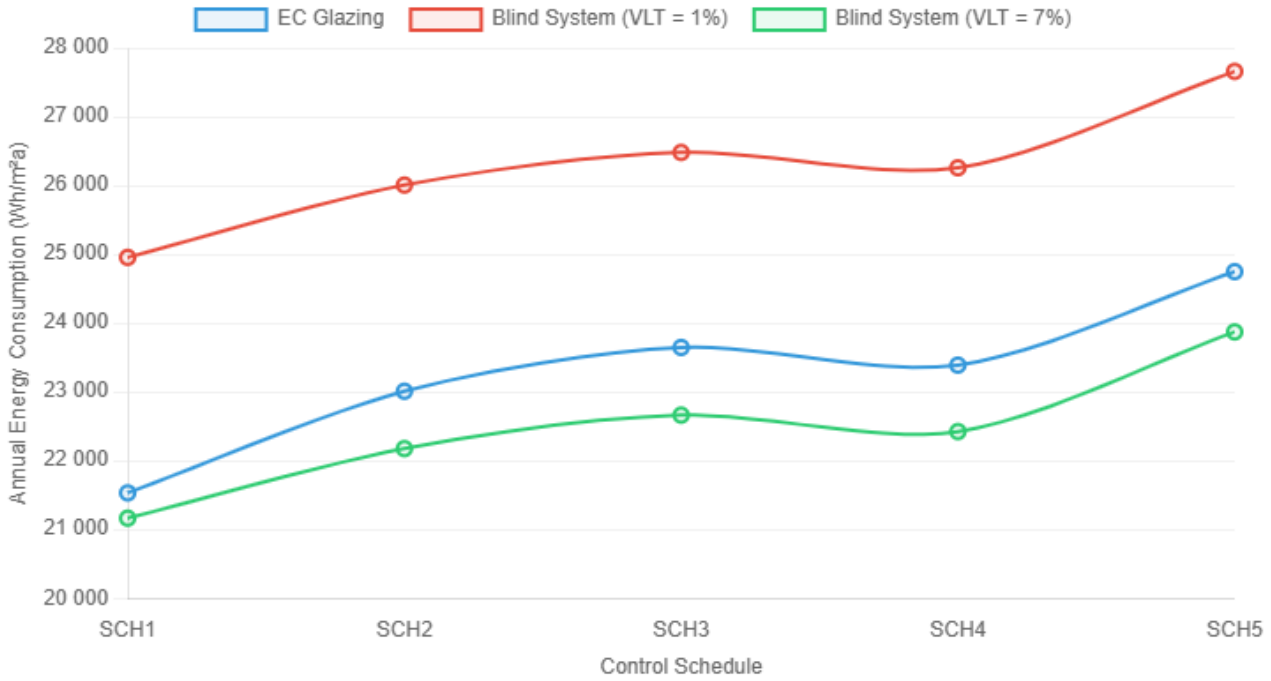


Fig. 7 – Annual lighting energy consumption (Fluorescent scenario) across control schedules.

Visual comfort was assessed by calculating the frequency of "Intolerable Glare" (DGP > 0.45) for two workstation views. The detailed results are presented in Table 2. The distribution of intolerable glare frequencies across all control schedules is presented in Fig. 8. For west-facing views, which experience more critical afternoon solar exposure, the blind system with VLT = 1% maintained exceptional glare control across all scenarios, with intolerable glare frequencies remaining below 1.37% under ideal control and decreasing to 0.19% with delayed operation.

Tab. 2 Intolerable Glare Frequencies (DGP > 0.45) by Façade System, Orientation and Control Schedule.

Façade System	Control Schedule	Intolerable Glare (DGP > 0.45) Frequencies West-facing View [%]	Intolerable Glare (DGP > 0.45) Frequencies East-facing View [%]
EC Glazing	SCH1	6.79	5.37
	SCH2	6.44	4.47
	SCH3	4.99	4.44
	SCH4	6.36	4.14
	SCH5	4.74	3.51
Triple-pane glazing with a blind system (VLT = 1%)	SCH1	1.37	0.36
	SCH2	0.47	0.11
	SCH3	0.22	0.11
	SCH4	0.47	0.11
	SCH5	0.19	0.11
Triple-pane glazing with a blind system (VLT = 7%)	SCH1	6.58	3.69
	SCH2	6.44	3.64
	SCH3	4.96	3.62
	SCH4	5.73	3.34
	SCH5	4.79	3.29

The EC glazing and blind system with VLT = 7% exhibited similar glare profiles for west-facing orientations. Both systems showed baseline frequencies of 6.79% and 6.58% respectively, exceeding the 5% threshold specified in EN 17037 [41]. Notably, these systems showed improved glare performance with delays, reaching minimum values of 4.74% and 4.79% under SCH5, though remaining near the acceptability threshold.

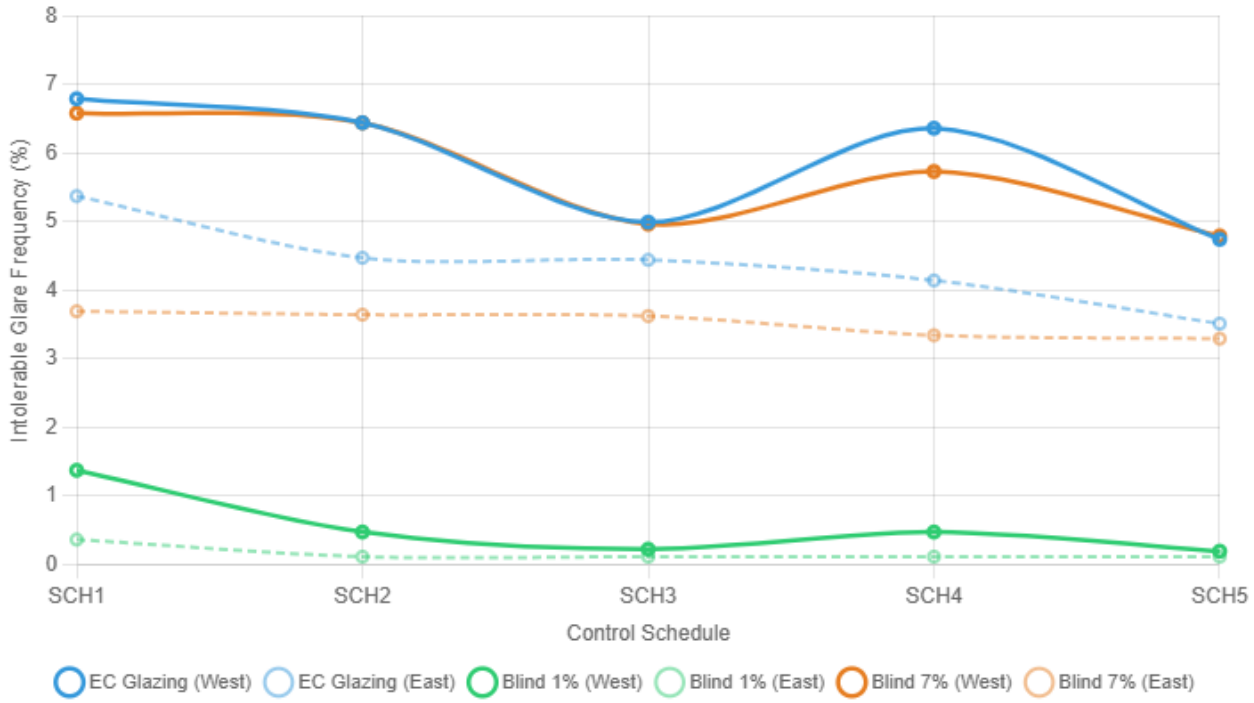


Fig. 8 – Glare Frequency across control schedules for three façade systems.

4. Discussion

This study confirms that the real-world performance of dynamic façade systems is highly sensitive to their operational control schedule. The findings demonstrate a clear trade-off between maximizing daylight availability and ensuring visual comfort, a balance that is significantly disrupted by realistic delays in user or system responses. The novel use of an LLM to generate varied control schedules proved to be an effective method for modeling these operational delays, which, when used as inputs for daylight simulations, allowed their impact to be accurately quantified.

Our primary finding confirms that control delays cause substantial performance degradation in all dynamic façade systems, highlighting that human factors are a fundamental constraint on building performance. The magnitude of these impacts, particularly the 20-22% reduction in DA under next-day response scenarios suggests that conventional simulations may overestimate the benefits of dynamic façades by assuming instantaneous or near-instantaneous control responses. This discrepancy aligns with observations that manual operation of shading devices is often suboptimal [17,19,22,46,47].

The analysis reveals distinct performance groupings among the evaluated systems that persist across all control scenarios. The blind system with VLT = 1% occupies a unique position, consistently providing superior glare control with intolerable glare frequencies below the EN 17037 threshold [41]. However, this glare protection comes at the cost of significantly reduced daylight availability (32.65% baseline DA) and the highest energy consumption (9,982 Wh/m²a LED), while also exhibiting the greatest sensitivity to control delays.

The EC glazing and blind system with VLT = 7% demonstrate similar performance profiles across all metrics, both achieving high DA (41.89% and 42.88% respectively) and low energy consumption (8,613 and 8,466 Wh/m²a LED). However, both systems fail to provide adequate glare protection, with west-facing intolerable glare frequencies exceeding 6.5% even under ideal control, well above the 5% acceptability threshold. This similarity suggests that from a purely quantitative performance perspective, EC glazing offers no significant advantage over a conventional blind system with moderate visible light transmission. These two systems that initially failed the glare requirements in SCH1 have improved glare performance with delayed schedules. For instance, under SCH5, the EC glazing's glare frequency dropped from 6.79% to 4.74%, bringing it within the acceptable range. This occurs because the façade remains in a protective (tinted or closed) state for longer, inadvertently blocking potential glare in subsequent hours. This result clearly exposes the inherent conflict between daylight optimization and glare mitigation: schedules that are poor for daylighting can be beneficial for visual comfort and vice-versa.

The qualitative differences between these systems - such as EC glazing's ability to maintain unobstructed views while tinted, or the mechanical simplicity of blind systems - may therefore become the primary selection criteria when both systems offer comparable quantitative performance. The additional capital cost of EC glazing would need to be justified by these qualitative benefits or by considerations not captured in this analysis, such as occupant preference, aesthetic requirements or maintenance considerations.

The finding that random delays (SCH4) and fixed three-hour delays (SCH3) produce nearly identical outcomes has implications for control system design and simulation. This equivalence suggests that stochastic occupant behavior, despite its apparent complexity, can be adequately represented by simplified deterministic models for annual performance predictions. This observation supports the development of rule-based control algorithms that anticipate typical delay patterns rather than attempting to respond to individual occupant preferences in real-time.

The successful application of LLMs for generating complex control schedules represents a methodological advancement with implications beyond this specific study. The ability to programmatically generate multiple nuanced scenarios through natural language prompts dramatically reduces the labour involved in sensitivity analysis and enables exploration of operational patterns that would be impractical to create manually. This approach could be extended to other building simulation workflows where realistic operational schedules are needed, such as occupancy patterns, equipment usage or HVAC setpoint modifications. As these tools continue to evolve, their integration into building performance simulation workflows could enable more comprehensive uncertainty analyses and more realistic representation of human-building interactions.

4.1 Limitations

Several limitations must be acknowledged when interpreting these results. The occupancy schedule assumed (8:00 AM to 5:00 PM) represents traditional office hours and may not reflect contemporary flexible working patterns or other building types. The impact of control delays may be different for residential applications, educational facilities, or healthcare environments where occupancy patterns and daylight requirements differ substantially. Furthermore, while the LLM-generated schedules represent a significant methodological advancement over manual creation, they are still simplified representations of complex human behavior.

The control logic based on horizontal illuminance thresholds, while following established standard IES-NA LM-83 [35], represents only one possible approach to dynamic façade control. Alternative strategies based on vertical eye illuminance, luminance ratios, or predictive algorithms might show different sensitivity to delays.

5. Conclusion

This study quantitatively demonstrated that realistic operational delays significantly degrade the performance of dynamic façade systems, confirming the central hypothesis that the gap between simulated ideals and real-world outcomes is largely driven by suboptimal control. By evaluating three distinct façade technologies under five LLM-generated control schedules, this research provides crucial data on the trade-offs between daylight availability, energy consumption and visual comfort. The results met expectations by revealing a clear performance hierarchy and the substantial impact of delayed user responses.

The main findings can be summarized in the following highlights:

- Performance is highly sensitive to control delays: Delays in reopening shades or clearing glazing caused DA to drop by up to 22.4% and increased lighting energy consumption by up to 14.9%, confirming that even brief delays impose a significant energy penalty.
- A clear trade-off exists between daylighting and glare control: The blind system with low transmittance (VLT = 1%) provided excellent glare control but sacrificed daylight. Conversely, the EC glazing and the high-transmittance blind (VLT = 7%) offered superior daylighting at the cost of glare.
- The conflict between metrics was confirmed: control delays improved glare performance for the systems by keeping them in a protective state longer, highlighting the inherent conflict between optimizing for daylight versus visual comfort.

Beyond these quantitative findings, it is important to acknowledge a qualitative aspect unique to EC glazing compared to blinds. While EC systems preserve the exterior view during modulation [48] - a key advantage over opaque shading devices - they inherently alter the color rendering properties (Color Rendering Index - CRI or Ra) of the transmitted daylight [49], which can affect the perceived indoor environment.

This research contributes to the field by quantifying the performance penalty of realistic control schedules, thereby confirming long-held assumptions about occupant behaviour. Furthermore, it successfully demonstrates the application of LLMs as an effective tool to generate complex, nuanced simulation inputs, offering a novel methodology to enhance the realism of future building performance studies.

6. Acknowledgement

This research was supported by the Young STU researchers support programme under Grant number 1634, the Slovak Research and Development Agency (APVV) under Grant number 18-0174 and the Cultural and Educational Grant Agency of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic (KEGA) under Grant number 036STU-4/2025.

References

[1] AYOUB, M. and ALLAM, A. S. GeneRT: A Generative Raytracing Tool for the rapid approximation of internal luminous conditions. *Journal of Building Engineering*. 2021, vol. 44, p. 102711. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102711

[2] DARULA, S., et al. *Guidelines for more realistic daylight exterior conditions in energy conscious designs*. Bratislava, Athens: Institute of Construction and Architecture, Slovak Academy of Sciences and National Observatory of Athens, 2000.

[3] GALATIOTO, A. and BECCALI, M. Aspects and issues of daylighting assessment: A review study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, vol. 66, pp. 852–860. Available at: https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.018

[4] YU, X. and SU, Y. Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation – A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, vol. 52, pp. 494–503. Available at: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.142

[5] MARTINHO, H., et al. Evaluating the impact of high-resolution irradiation data on the daylight performance assessment of adaptive solar shading systems. *Building and Environment*. 2024, vol. 262, p. 111816. Available at: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111816
[6] BERARDI, U. and ANARAKI, H. K. Analysis of the Impacts of Light Shelves on the Useful Daylight Illuminance in Office Buildings in Toronto. *Energy Procedia*. 2015, vol. 78, pp. 1793–1798. Available at: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.310
[7] GHOSH, A. and NORTON, B. Advances in switchable and highly insulating autonomous (self-powered) glazing systems for adaptive low energy buildings. *Renewable Energy*. 2018, vol. 126, pp. 1003–1031. Available at: https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.038
[8] CANNAVALE, A., et al. Smart Electrochromic Windows to Enhance Building Energy Efficiency and Visual Comfort. *Energies*. 2020, vol. 13, no. 6, p. 1449. Available at: https://doi.org/10.3390/en13061449
[9] MICHAEL, M., et al. A Systematic Review and Classification of Glazing Technologies for Building Façades. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 14, p. 5357. Available at: https://doi.org/10.3390/en16145357
[10] DALUMO, D. B. and LIM, Y.-W. Comparative Study on Computer Simulation of Solar Shading Performance with Heliodon and Artificial Sky. *Journal of Daylighting*. 2021, vol. 8, pp. 50–64. Available at: https://doi.org/10.15627/jd.2021.4
[11] OH, M., et al. Analysis of Heating and Cooling Loads of Electrochromic Glazing in High-Rise Residential Buildings in South Korea. *Sustainability*. 2018, vol. 10, no. 4, p. 1121. Available at: https://doi.org/10.3390/su10041121
[12] DEFOREST, N., et al. Regional performance targets for transparent near-infrared switching electrochromic window glazings. *Building and Environment*. 2013, vol. 61, pp. 160–168. Available at: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.004
[13] WU, Y., et al. Split-pane electrochromic window control based on an embedded photometric device with real-time daylighting computing. *Building and Environment*. 2019, vol. 161, p. 106229. Available at: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106229
[14] DAY, J. K., et al. Blinded by the light: Occupant perceptions and visual comfort assessments of three dynamic daylight control systems and shading strategies. *Building and Environment*. 2019, vol. 154, pp. 107–121. Available at: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.037
[15] DUBOIS, M.-C., et al. *Daylighting and lighting: under a Nordic sky* [online]. Lund: Division of Energy and Building Design, Lund University, 2025. ISBN 978-91-8104-401-0.
[16] ALKHATIB, H., et al. Comparative simulations of an electrochromic glazing and a roller blind as controlled by seven different algorithms. *Results in Engineering*. 2023, vol. 20, p. 101467. Available at: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101467
[17] KONIS, K. and SELKOWITZ, S. *Effective Daylighting with High-Performance Façades* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-39461-9.
[18] IRVINE, K., et al. Retrofit electrochromic glazing in a UK office – an initial evaluation. *SDAR Journal of Sustainable Design & Applied Research* [online]. 2014, vol. 2, no. 1, Article 4. [Accessed 20/09/2025]. Available at: https://arrow.dit.ie/sdar/vol2/iss1/4/
[19] DEFOREST, N., et al. A comparative energy analysis of three electrochromic glazing technologies in commercial and residential buildings. *Applied Energy*. 2017, vol. 192, pp. 95–109. Available at: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.007
[20] OSTERHAUS, W. K. E. Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments. *Solar Energy*. 2005, vol. 79, no. 2, pp. 140–158. Available at: https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.11.011
[21] NAGARE, R., et al. Access to Daylight at Home Improves Circadian Alignment, Sleep, and Mental Health in Healthy Adults: A Crossover Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021, vol. 18, no. 19, p. 9980. Available at: https://doi.org/10.3390/ijerph18199980

[22] GANJI KHEYBARI, A., et al. Controlling Switchable Electrochromic Glazing for Energy Savings, Visual Comfort and Thermal Comfort: A Model Predictive Control. *CivilEng*. 2021, vol. 2, no. 4, pp. 1019–1051. Available at: https://doi.org/10.3390/civileng2040055
[23] FATHI, S. and KAVOOSI, A. Effect of electrochromic windows on energy consumption of high-rise office buildings in different climate regions of Iran. *Solar Energy*. 2021, vol. 223, pp. 132–149. Available at: https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.021
[24] TÄLLBERG, R., et al. Comparison of the energy saving potential of adaptive and controllable smart windows: A state-of-the-art review and simulation studies of thermochromic, photochromic and electrochromic technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2019, vol. 200, p. 109828. Available at: https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.02.041
[25] HAN, J., et al. ChatGPT in Scientific Research and Writing: A Beginner's Guide. In: HAN, J. et al. *ChatGPT in Scientific Research and Writing* [online]. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 1–109. ISBN 978-3-031-66939-2. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-66940-8
[26] LI, A., et al. Active learning concerning sampling cost for enhancing AI-enabled building energy system modeling. *Advances in Applied Energy*. 2024, vol. 16, p. 100189. Available at: https://doi.org/10.1016/j.adapen.2024.100189
[27] AZIMI, M., et al. A comprehensive data-driven approach for urban configuration: future climate and predict energy efficiency. *Energy Conversion and Management*. 2024, vol. 342, p. 120083. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120083
[28] ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES. Rhinoceros 3D [online]. [Accessed 20/09/2025]. Available at: https://www.rhino3d.com
[29] ClimateStudio. In: Solemma [online]. [Accessed 20/09/2025]. Available at: https://www.solemma.com/climatestudio
[30] LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. *Complex Glazing Database (CGDB) Downloads* [online]. [Accessed 20/09/2025]. Available at: https://windows.lbl.gov/cgdb-downloads
[31] SAGEGLASS. *SageGlass* [online]. [Accessed 20/09/2025]. Available at: https://www.sageglass.com
[32] REMUND, J., et al. *Meteonorm 8, Handbook part I: Software* [online]. Meteotest AG, 2023. [Accessed 20/09/2025]. Available at: https://www.meteonorm.com/en/downloads
[33] REMUND, J., et al. *Meteonorm 8, Handbook part II: Theory* [online]. Meteotest AG, 2023. [Accessed 20/09/2025]. Available at: https://www.meteonorm.com/en/downloads
[34] EN 14501:2021, Blinds and shutters - Thermal and visual comfort - Performance characteristics and classification. In: *iTeh Standards* [online]. [Accessed 29/08/2025]. Available at: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/8b0257b8-f10b-4994-ae49-2493d6cd12ab/en-14501-2021
[35] ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. *Approved method: IES spatial daylight autonomy (sDA) and annual sunlight exposure (ASE).* New York, N.Y.: Illuminating Engineering Society of North America, 2012. ISBN 978-0-87995-272-3.
[36] Google Gemini. In: *Gemini* [online]. [Accessed 29/08/2025]. Available at: https://gemini.google.com
[37] KONSTANTZOS, I. and TZEMPELIKOS, A. Daylight Glare Probability Measurements And Correlation With Indoor Illuminances In A Full-Scale Office With Dynamic Shading Controls. In: *Proceedings of Building Simulation* 2013: 13th Conference of IBPSA, August 2013, Chambéry, France. 2013, pp. 3494-3501.
[38] ABDELWAHAB, S. and SOBH, H. Visual Discomfort Analysis as a Tool to Support Façade Shading Design: A Case Study in the Architectural Design Studio. *Journal of Architectural Engineering* [online]. 2022, vol. 28, no. 2. Available at: https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000533

[39] MATIN, N. H., et al. Sustainable Design: Minimizing Discomfort Glare Through Data-Driven Methods for Responsive Façades. *Sustainability.* 2025, vol. 17, no. 2, p. 783. Available at: https://doi.org/10.3390/su17020783
[40] JAKUBIEC, J. A. and REINHART, C. F. Predicting Visual Comfort Conditions In A Large Daylit Space Based On Long-term Occupant Evaluations: A Field Study. In: *Proceedings of Building Simulation* 2013: 13th Conference of IBPSA [online]. August 2013, Chambéry, France. [Accessed 20/09/2025]. Available at: https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bs2013_1034
[41] STN EN 17037: 2020, Daylight in buildings. Bratislava: Slovak Office of Standards, Metrology and Testing SR, 2020.
[42] CARLUCCI, S., et al. A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, vol. 47, pp. 1016–1033. Available at: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.062
[43] IVERSEN, A., et al. The effect of different weather data sets and their resolution on climate-based daylight modelling. *Lighting Research & Technology*. 2013, vol. 45, no. 3, pp. 305–316. Available at: https://doi.org/10.1177/1477153512440545
[44] STN 73 0540-2+Z1+Z2, Thermal protection of buildings Thermal performance of buildings and components. Slovak Office of Standards, Metrology and Testing SR, 2019.
[45] EN 15193-1:2017, Energy performance of buildings - Energy requirements for lighting - Part 1: Specifications, Module M9. In: iTeh Standards [online]. [Accessed 30/08/2025]. Available at: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/27f5f469-3bb7-48ce-9a90-2bae59e778ab/en-15193-1-2017
[46] FERNANDES, L. L., et al. Lighting energy savings potential of split-pane electrochromic windows controlled for daylighting with visual comfort. *Energy and Buildings*. 2013, vol. 61, pp. 8–20. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.057
[47] SBAR, N. L., et al. Electrochromic dynamic windows for office buildings. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2012, vol. 1, no. 1, pp. 125–139. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2012.09.001
[48] BOUVARD, O. V. C. *Coatings with tailored electronic and optical properties for advanced glazing*. PhD Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 2019. Available at: https://infoscience.epfl.ch/record/262796
[49] CANNAVALE, A., et al. Smart Electrochromic Windows to Enhance Building Energy Efficiency and Visual Comfort. *Energies*. 2020, vol. 13, no. 6, p. 1449. Available at: https://doi.org/10.3390/en13061449

Kristína Hanesová
Študijný program: teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník: II.

MOŽNOSTI APLIKÁCIE VYBRANÝCH TYPOV KONŠTRUKCIÍ A KONŠTRUKČNÝCH DETAILOV V DOČASNEJ ARCHITEKTÚRE

POSSIBILITIES FOR THE APPLICATION OF SELECTED TYPES OF STRUCTURES AND CONSTRUCTION DETAILS IN TEMPORARY ARCHITECTURE

Abstract
The thesis examines the applicability of selected types of structures in temporary architecture. Through case studies and literature review, it seeks to systematically categorize and describe the most commonly used systems. The construction is divided into three principal parts: foundation systems (ground screws, ballast anchoring, prefabricated footings); load-bearing systems (timber stud/frame systems, panel systems—CLT/plywood—and modular scaffolding systems); and envelope systems (a wide diversity of materials enabling experimentation and innovation). The text emphasizes that temporariness is embedded already at the design stage, through reversible solutions without land disturbance, lightweight and repeatedly reusable components, and low material and economic demands.

Kľúčové slová / Key Words
Dočasné konštrukcie, reverzibilné základy, recyklácia, lešenárske konštrukcie,

1. Úvod

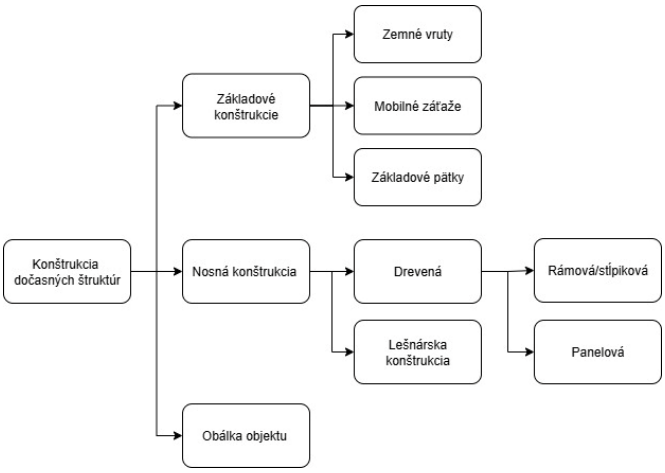
Dočasnú architektúru možno chápať ako svojbytný fenomén presahujúci jednotlivé typologické kategórie. Jej dôležitosť vychádza z rýchlo meniaceho sa tempa dnešnej doby a nárokov spoločnosti na stále nové stimuly, kedy dokáže byť svojou flexibilitou stále relevantná. Zároveň je pri dobre zvolenom materiáli a konštrukcií, častokrát vhodným udržateľným riešením niektorých urbanistických, komunitných alebo spoločenských problémov. V dnešnej dobe ju môžeme vidieť v rôznych typologických druhoch, s funkciami ako obytnou, vzdelávacou, výstavnou, obchodnou, potom ako objekty alebo zásahy organizujúce priestor, umelecké objekty a napokon iné dočasné stavby. Jedná sa o veľkú škálu objektov v podobe mobilných domov, núdzovej architektúry pri prírodných katastrofách, rôzne výstavné pavilóny, mestské intervencie alebo architektúru spojenú s rôznymi krátkodobými podujatiami. Okrem typológie sa odlišuje aj svojou mierkou, dĺžkou trvania , konštrukciou a materialitou. [1]

Jedným z faktorov, ktorý túto architektúru robí dočasnou, je prvotný zámer opustiť miesto a nezostať permanentnou. Tento zámer by mal byť už od začiatku komunikovaný dizajnom a to

1 Kristína Hanesová, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava

napríklad ľahkou mobilnou konštrukciou, alebo materiálmi, ktoré sú jednoducho rozobrateľné alebo menej trvácne. [2]

Pri veľkom počte funkcií, mierok, materiálov sa môže na prvý pohľad zdať že sa tieto štruktúry odlišujú a nedá sa v nich nájsť nejaký ucelený systém. Pri bližšom skúmaní prípadových štúdií môžeme ale vidieť, že konštrukčné prvky a materiálové riešenia sa častokrát opakujú a kreatívne medzi sebou kombinujú. Z hľadiska celkovej konštrukcie dočasných štruktúr, môžeme ich stavbu rozdeliť na tri základné celky: základové konštrukcie, nosná konštrukcia a obalová konštrukcia. Špecifický príklad tvoria konštrukcie, kde je obalová a nosná konštrukcia zlúčená do jedného prvku.



Obrázok 1: Základné rozdelenie prvkov konštrukcie dočasných objektov (autor)

2. Základové konštrukcie

Základové konštrukcie sú také prvky, ktoré prenášajú zaťaženie vyvolané stavbou do základovej pôdy. Konštrukčný systém budovy, základové konštrukcie a základová pôda sa spoločne podieľajú na zabezpečení stability celej stavby. [3] Pri dočasných stavbách sa základové konštrukcie riešia flexibilnejšie a menej invazívne oproti permanentným stavbám. Hlavné kritéria výberu základových konštrukcií sú typ pokladu, veľkosť objektu , doba trvania stavby.

2.1 Zemné vruty

Zemné vruty sú založené na princípe pilótových základov. Nepotrebujú žiadne výkopové práce ani mokré procesy, minimálne narúšajú terén okolia stavby, dajú sa ľahko odstrániť a sú znova použiteľné. Pozostávajú z pozinkovanej oceľovej rúrky s privareným závitom, ktorá slúži na prenášanie vodorovných aj zvislých zaťažení do podložia. Tá sa či už pomocou špeciálnych mechanických strojov alebo manuálnych nástrojov vŕta do terénu. Tento typ založenia dokáže preniesť rovnaké zaťaženia ako betónové základy. [4]

Obrázok 2: Príklady použitia zemných vrutov

2.2 Mobilné záťaže

Mobilné základy slúžia ako protizávažia k zabezpečeniu stability štruktúry pri odolávaní veterným náporom. Ich hlavnou výhodou je, že nenarúšajú terén, sú mobilné a znova použiteľné. Pri dočasných stavbách sa v komerčných typológiách ako festivalové stany, pódia a pod. používajú väčšinou betónové záťažové bloky. Ich nevýhodou je však vysoká hmotnosť a komplikovaná doprava a na miesto výstavby. Viac praktické pre sú napríklad pieskové vaky, alebo záťaže napustené vodou, kde sa voda do závaží napustí až na mieste a zjednoduší sa preprava a manipulácia na stavbe. Jedným z konkrétnych príkladov je vyhliadková plošina Cabane 7L v záhradách Villa Medici v Ríme. V podlahovej konštrukcií je skrytých 16 zásobníkov vody s objemom 260 litrov. Medzi možné nevýhody môže patriť vandalizmus respektíve únik záťažovej látky zo zásobníkov.

Obrázok 3: Príklady aplikácie rôznych druhov mobilného zaťaženia

2.3 Základové pätky

Pri tomto type základov sú vertikálne prvky konštrukcie kotvené do základových pätiek. Tie sú zväčša pri dočasných štruktúrach riešené ako prefabrikované bloky. Základová pätka môže byť umiestnená na povrchu, keď nie je vhodné alebo možné narúšať terén. Jedná sa o esteticky výraznejšie riešenie v porovnaní s polo zapustenými alebo úplne zapustenými pätkami, ktoré sú nenápadnejšie. Pri návrhu v nerovnom teréne môžu pätky slúžiť na vyrovnanie výškových rozdielov, aby vytvorili rovinu pre uloženie nosnej konštrukcie podlahy.

Obrázok 4: Príklady aplikácie rôznych druhov základových pätiek

3. Nosná konštrukcia

3.1 Drevená nosná konštrukcia

V drevostavbách na základe konštrukcie poznáme niekoľko druhov konštrukčných systémov. Sú to hlavne zrubové, panelové, stĺpikové, skeletové, hrázdené konštrukcie, no pri dočasných štruktúrach sa využívajú hlavne stĺpikové a panelové systémy. **[9]**

3.1.1 Drevená panelová nosná konštrukcia

Panelová nosná konštrukcia sa vyznačuje tým že, steny sú v plnej ploche tvorené drevným materiálom. Nosná časť nie je redukovaná na jednotlivé podpery. Pri takomto type nosnej konštrukcie sa môže využívať lepené laminované drevo, známe aj ako CLT panely, ktoré sa vyrába naskladaním hobľovaných vysušených drevených lamiel hr. 19-40 mm krížom na seba. Týmto spôsobom sa vytvára celistvý jednoliaty materiál s vysokou pevnosťou. CLT umožňuje, aby štruktúry využívali modulárny systém, vďaka čomu sú ľahko demontovateľné a môžu byť opätovne využité. Pre variantu s nižšou hmotnosťou sa niekedy pri menších inštaláciách používa preglejka. **[7]**

Obrázok 5: Rôzne aplikácie panelovej konštrukcie pri dočasnej architektúre

3.1.2 Drevená stĺpiková/rámová nosná konštrukcia

Tento typ nosnej konštrukcie, pozostáva zo stĺpov, nosníkov a stužujúcich prvkov usporiadaných do pravidelného rastra. Veterné zaťaženie vytvára vodorovné sily, ktoré musia byť zachytené stužujúcimi doskami. Túto funkciu dosiek v horizontálnej rovine preberajú strechy a zavesené stropy. Vzniknuté sily sa následne prenášajú do základov pomocou zvislého stuženia.

Vodorovné stuženie môže byť riešené diagonálnym oceľovým stužením v rovine strechy, diagonálnym stužením z oceľových pásov alebo doskovými materiálmi na báze dreva; zvislé stuženie zas môže tvoriť oceľové X-stuženie (z pásnic alebo okrúhlych profilov), masívne drevené diagonály alebo celoplošné dosky z drevnej doskovej konštrukcie. **[8]**

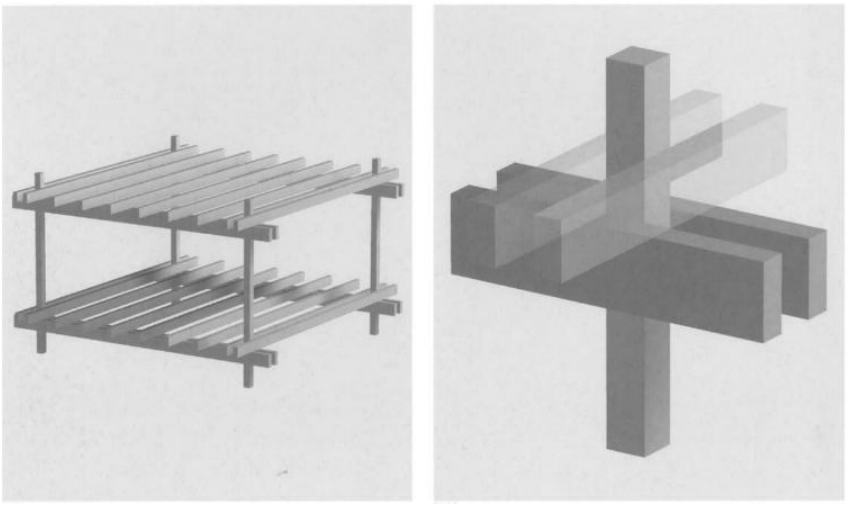
Obrázok 6: Príklady dočasných štruktúr s použitím stĺpikovej konštrukcie v kombinácií s rôznymi obalovými materiálmi

4.Spôsoby usporiadania stĺpov a nosníkov s typmi spojov

Rozlišujeme viacero foriem drevených rámových konštrukcií, ktoré sa líšia usporiadaním stĺpov a nosníkov a typmi spojov. **[8]**

4.1 Stĺpy a združené nosníky

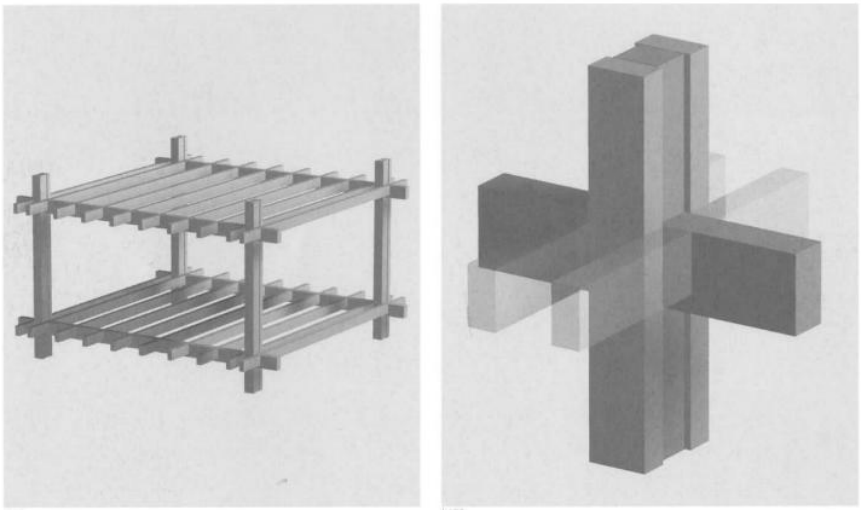
Forma konštrukcie so stĺpmi nesúcimi združené (dvojité) nosníky má primárnu konštrukciu zloženú z jednodielnych stĺpov a dvojdielnych priebežných nosníkov. Tento typ usporiadania je veľmi podobný väznicovej sústave so strednou väznicou a často sa používa pre svoju jednoduchosť, ktorá vedie k celkovo ekonomickému riešeniu. **[8]**



Obrázok 7: Stĺpy sú zhotovené z jedného dielu, nosníky z dvoch dielov

4.2 Nosníky a združené stĺpy

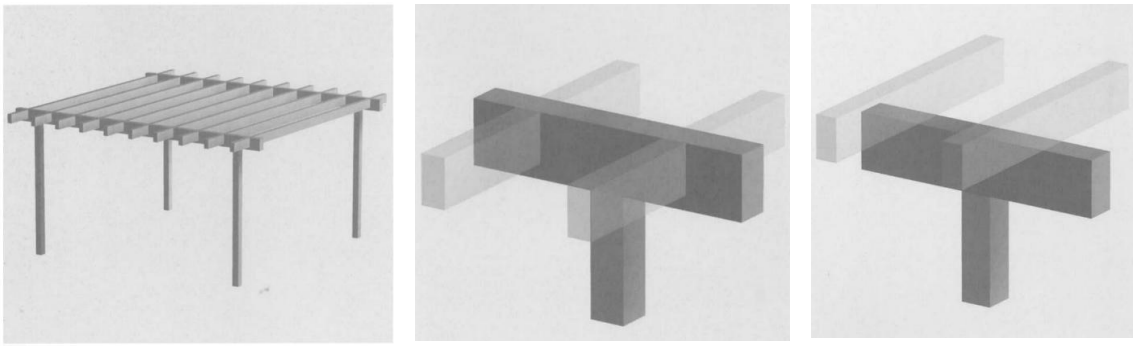
Nosníky vyhotovené z jedného kusu sú spojené s priebežnými združenými (dvojitými) stĺpmi pomocou mechanických spojovacích prvkov. **[8]**



Obrázok 8: Stĺpy sú zhotovené z dvoch dielov, nosníky z jedného

4.3 Stĺpy a presahujúce nosníky

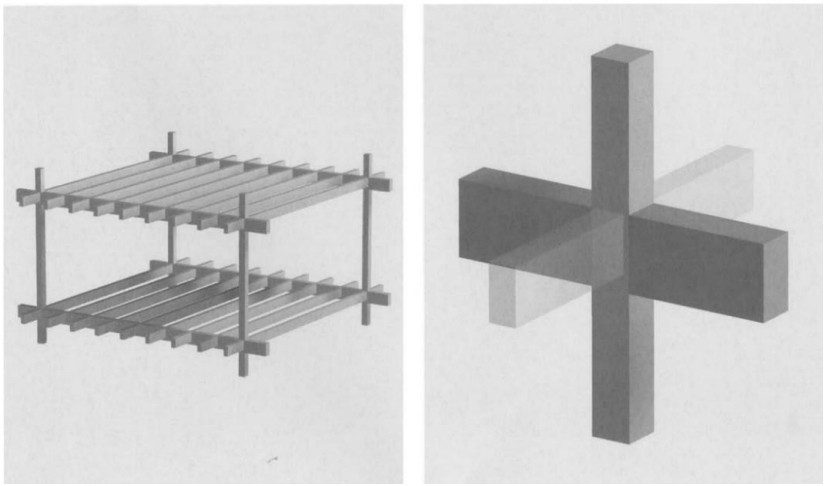
Jednoduchá forma konštrukcie s jednodielnymi stĺpmi a nosníkmi je vhodná pre jednopodlažné stavby s plochou strechou. Nosníky môžu byť buď jednoducho podopreté, alebo priebežné cez dva či viac rozponov. Sekundárne nosníky (stropnice) môžu byť uložené priamo na hlavných nosníkoch alebo osadené tak, aby ich horné plochy lícovali s hornými plochami hlavných nosníkov.



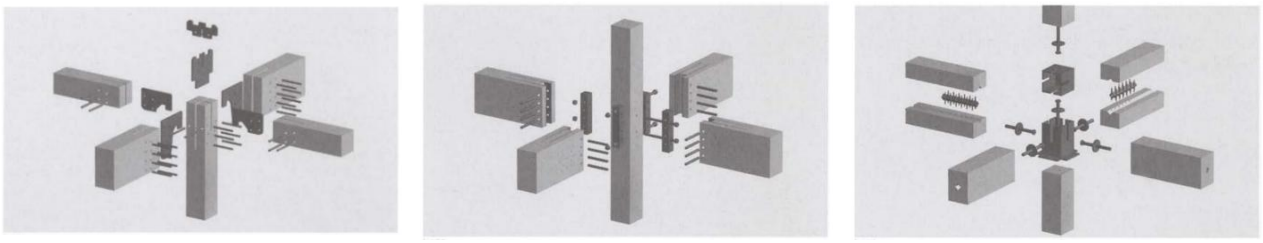
Obrázok 9: Jednodielny nosník nesie stĺpy a presahujúce nosníky priamo na hornej ploche stĺpa. a) horné plochy sekundárnych konštrukcií lícujú s hornou plochou primárnej konštrukcie b)sekundárne konštrukcie sú uložené priamo na primárnej konštrukcii

4.4 Nosníky a priebežné stĺpy

Primárnu konštrukciu tohto systému tvoria priebežné stĺpy a hlavné nosníky navrhnuté ako jednoducho podopreté prvky rozpäté medzi stĺpmi. V tomto usporiadaní sú horizontálne nosníky aj vertikálne stĺpy jednodielne prvky spojené v tej istej vertikálnej rovine.



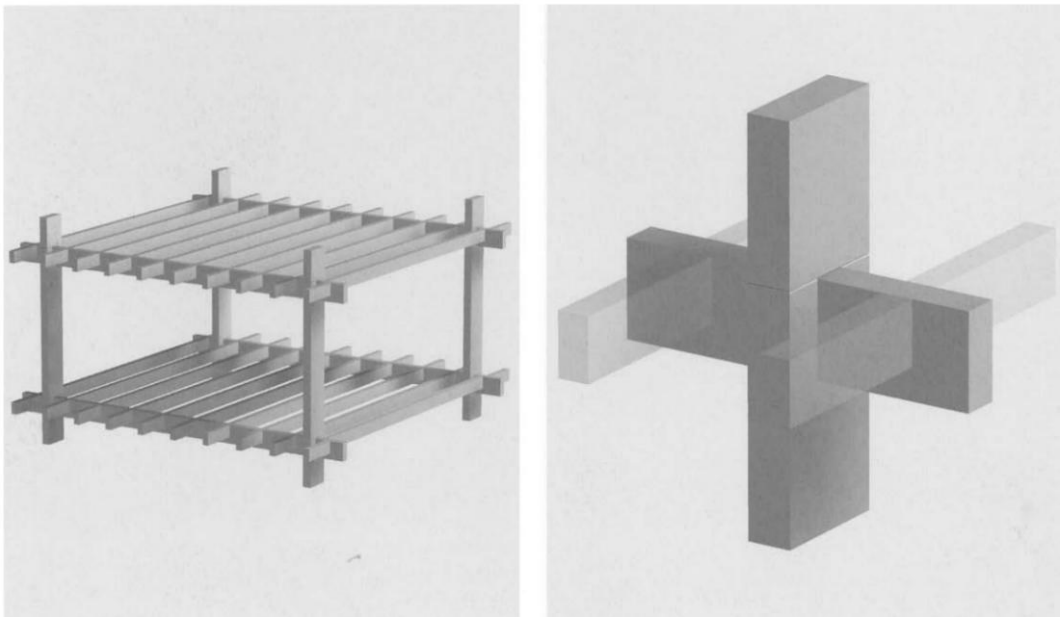
Obrázok 10: Nosníky sú pripojené k priebežným stĺpom



Obrázok 11:Typy spojov vertikálnych a horizontálnych konštrukcií: a)Janebo spoj (stĺp–nosník v jednej rovine) b)BSB spoj (priebežné stĺpy a napájanie nosníkov z viacerých strán) c)Induo spoj (montované drevené rámy)

4.5 Vidlicové stĺpy

Primárna konštrukcia má podobu jednodielneho priebežného nosníka, ktorý je podopretý stĺpmi s výškou jedného podlažia. Stĺpy sú navzájom spojené prostredníctvom vidlíc, čo predstavuje jednoduchý a účinný spôsob, ako udržať nosníky v polohe a preniesť zvislé zaťaženia[8]



Obrázok 12: Hlavný nosník prechádza cez stĺpy

5. *Lešenárske systémy*

Výhodou stavebných lešení je ich modulárnosť a schopnosť rýchlej, jednoduchej montáže aj demontáže. Jedná sa o modulový systém, z oceľových rúrok a výrobcami definovanými spojmi. Lešenia sú primárne vertikálne nosné systémy; vodorovné zaťaženia sa spravidla odvedú cez napojenie na susedné objekty, resp. cez diagonálne stuženie. Podľa typu spojov a konštrukcie rozdeľujeme lešenárske konštrukcie na rôzne druhy systémov:

- oceľové rúrkové lešenie so spojkami
- Ring-Lock systémy,
- Cup-Lock systémy,
- systém „Scaffold“ (modulárne rámové lešenie).

Najrozšírenejšie sú oceľové rúrkové lešenia s otočnými spojkami , sú veľmi flexibilné a rozšírené no ich únosnosť je obmedzená . Tento typ spojov dovoľuje prakticky natáčanie v ľubovoľnom uhle, ale prenos síl prebieha sčasti len trením a ohybové momenty sa prenášajú iba veľmi obmedzene. Ring-Lock systémy stĺpiky a priečniky spájajú cez kruhovú rozetu s preddefinovanými otvormi. Rozeta zabezpečuje to že prenos momentov je oproti svorkovému systému pomerne bezpečný, no nevýhodou je že geometrické možnosti sú viac obmedzené. Cup-Lock systémy fungujú na tak že zvislý stĺpik má v pravidelných rozostupoch privarené polovičné liatinové „poháriky“ do ktorých sa potom zasúvajú horizontálne alebo diagonálne prvky. Vrchná polovica „pohárika“ sa potom zaklapne nadol čím zafixuje prvky na mieste bez pomoci skrutiek. Systém „Scaffold“ je používaný najmä v USA kde sú na stĺpiky privarené pätky a tie umožňujú napájanie horizontálnych prvkov pomôckou špeciálnych spojok. [5]

Obrázok 13: Lešenárska konštrukcia v kombinácií s rôznymi materiálmi

6. Obalová konštrukcia

Práve obalová konštrukcia je pri dočasných stavbách a inštaláciách miestom experimentovania s tradičnými, novými alebo recyklovanými materiálmi. Krátka trvanlivosť stavieb sa odzrkadľuje aj nižších nárokoch na obalové materiály. Je ťažké ich zaradiť do jednotlivých kategórií. Od tradičných materiálov ako textílie, drevo, plech alebo poly karbonát môžu byť použité materiály ako napríklad matrace ako pri pavilóne „Sultan“ v Kodani. „The Growing Pavilion“ sa skladá z drevenej nosnej konštrukcie medzi ktorú sú potom vkladané panely z mycélia. Prototyp prístrešku pre bicykle navrhnutý študentmi v Grenobli, využíva na svoje opláštenie staré sedačky. Ďalej môžeme vidieť príklady dočasných stavieb z prírodných materiálov ako napríklad slama, alebo netradičné riešenie v podobe kukuričných šúľkov. Obálka stavby ponúka architektom možnosť kreatívne vyjadriť svoj hlbší ideový zámer, napríklad dôraz na udržateľnosť a ekológiu.

Obrázok 14: Netradičné materiály použité ako obalová konštrukcia

Záver

Dočasná architektúra v posledných rokoch výrazne napreduje. Ukazuje sa ako účinný komunitný nástroj – podporuje budovanie vzťahov, aktiváciu zabudnutých mestských priestorov aj rýchle zásahy „prvej pomoci“ pri núdzových situáciách. Táto práca nemala ambíciu obsiahnuť všetky existujúce riešenia; pri nosných systémoch napríklad nezahrnula kartónové trubice známe zo stavieb Shigeru Bana. Zámerne sa sústredila na to, čo je v praxi najpoužívanejšie : drevené konštrukcie a lešenárske systémy v kombinácií s reverzibilnými základovými konštrukciami.
Tieto systémy vynikajú nízkymi nákladmi, jednoduchou a rýchlou montážou, flexibilitou usporiadania a možnosťou opätovného použitia prvkov. Práve tieto parametre sú kľúčové vtedy, keď dočasnú architektúru nechápeme len ako „výstup architekta“, ale ako infraštruktúru pre komunitu – takú, ktorú si ľudia dokážu s primeraným vedením postaviť, upravovať a udržiavať aj sami.

Na základe zistení práca odporúča uprednostniť reverzibilné zakladanie bez trvalého zásahu do terénu a zároveň také kde môžu byť základové prvky opätovne využité. Navrhovať nosnú konštrukciu modulárne, s opakovane použiteľnými prvkami a štandardizovanými spojmi. Podporovať komunitnú participáciu – návrh prispôsobovať tak, aby bola výstavba a údržba realizovateľná aj laickými tímami. Myslieť na logistiku už v koncepte – plánovať demontáž, skladovanie a druhotné využitie dielcov ako integrálnu súčasť návrhu.

[1] Mańkowska, A., & Zaguła, A. (2022). *Temporary architecture in the 21st century as an expression of changes taking place in contemporary society*. **Architectus**, 1(69), 141–150. DOI: 10.37190/arc220112

[2] Chappell, B. D. (2007). *Efemérna architektúra: smerom k definícii*. Dostupné na: https://synth06iii.wordpress.com/wp-content/uploads/2020/04/ephemeral-architecture1.pdf

[3] ŽILINSKÝ, Juraj; ADAMSKÁ, Gabriela; MIKLÓSIOVÁ, Terézia. **Konštrukcie pozemných stavieb: Konštrukcie spodnej stavby.** Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, 2018. ISBN 978-80-227-4866-7

[4] **KRINNER Schraubfundamente GmbH.** *The advantages of KRINNER systems.* Online. Citované 28. 10. 2025.
Dostupné na: https://www.krinner.io/en/foundation-construction/advantages/

[5] **DETAIL – Zeitschrift für Architektur: Review of Architecture.** *53. Serie, 2013, Heft 10: Temporäre Bauten.* ISSN 0011-9571. str. 1128- 1134

[6] OTT, Clara – GONZÁLEZ, María Francisca. *Public Spaces with Scaffolding: an Alternative in Emergency Situations* [online]. ArchDaily, 29 May 2020 [cit. 2025-10-29]. Dostupné na: https://www.archdaily.com/940513/public-spaces-with-scaffolding-an-alternative-in-emergency-situations

[7] PAVLAS, Marek. *Dřevostavby z vrstvených masivních panelů: technologie CLT*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2016. 96 s. ISBN 978-80-271-0055-2

[8] KOLB, Josef. ***Systems in Timber Engineering: Loadbearing Structures and Component Layers.*** Basel: Birkhäuser, 2008. Edited by Lignum – Holzwirtschaft Schweiz, Zurich; DGfH – German Society of Wood Research, Munich. ISBN (print): 978-3-7643-8689-4;
[9] ŠPILÁK, Dominik a Ľudmila TEREŇOVÁ. *Stavebné konštrukčné systémy* Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2022. 74 s. ISBN 978-80-228-3350-9. str.86-103

Zdroje obrázkov:

Obrázok 2 Koláž (z ľava do prava) https://www.archdaily.com/979730/kiosque-contours-atelier-craft, https://www.archdaily.com/1022484/phula-va-1-plus-x

Obrázok 3 Koláž (z ľava do prava, z hora dole) https://www.archdaily.com/1020566/pavilion-atlas, https://www.designboom.com/architecture/shigeru-ban-disaster-relief-shelters-bamboo-paper-sydney-exhibition-scaf-australia-03-27-2017/ , https://www.archdaily.com/920868/gecit-wooden-pavilion-stefano-pugliese-plus-sebastian-erazo , https://concentrico.es/en/wildlings/ , https://www.archdaily.com/782058/selgascanos-helloeverything-louisiana-hamlet-pavilion-to-

house-a-school-in-nairobis-kibera-slum , https://divisare.com/projects/473755-alexis-dominguez-zuniga-diego-malo-woven-space

Obrázok 4 Koláž (z ľava do prava, z hora dole) https://divisare.com/projects/331122-lenschow-pihlmann-hampus-berndtson-konkav, https://divisare.com/projects/391116-ecol-shelter-n-1, https://www.archdaily.com/777900/nautilus-ten-plus-ngo-city-creative-network, https://www.archdaily.com/1034074/open-air-theater-lantsch-invias-ag?ad_source=search&ad_medium=projects_tab

Obrázok 5 Koláž (z ľava do prava, z hora dole) https://www.dezeen.com/2024/09/04/forum-des-vestiges-pratique-fanum-plywood-pavilion-villa-medici-rome/, https://www.archdaily.com/981576/mvrdv-unveils-celebratory-pavilion-of-the-fuggerei-social-housing-project-in-germany, https://www.archdaily.com/954407/young-art-biennale-infopoint-ab-chvoya, https://divisare.com/projects/315530-eduardo-souto-de-moura-jannis-kounellis-giovanni-nardi-andrea-martiradonna-xxi-triennale-di-milano-pavilion

Obrázok 6 Koláž (z ľava do prava, z hora dole) https://www.archdaily.com/1032240/round-about-baths-leopold-banchini-architects, https://www.archdaily.com/1021886/dome-next-door-toms-kampars-plus-hori-zonte-plus-jurgis-gecys-plus-antonella-amesberger, https://www.archdaily.com/986137/forum-pavilion-giona-bierens-de-haan-architectures , https://www.archdaily.com/1019360/cabane-7l-installation-manuel-bouzas, https://divisare.com/projects/507252-hytte-i-skov-festival-des-cabanes-2024, https://www.archdaily.com/790430/pavilion-of-reflections-studio-tom-emerson, https://grau.sk/project/tea-house-2,

Obrázok 13 Koláž(z ľava do prava, z hora dole) : https://divisare.com/projects/228565-j-mayer-h-schaustelle, https://www.archdaily.com/249746/wendy-opens-at-moma-ps1hwkn, https://www.archdaily.com/940513/public-spaces-with-scaffolding-an-alternative-in-emergency-situations

Obrázok 14 Koláž(z ľava do prava, z hora dole) : https://www.dezeen.com/2019/10/29/growing-pavilion-mycelium-dutch-design-week/ , https://static.dezeen.com/uploads/2019/10/Growing-Pavilion_dezeen_hero3-852x479.jpg http://www.na-architecture.fr/2017/03/reemploi-et-mobilite-douce/ https://www.wallpaper.com/architecture/chart-architecture-prize-recycled-ikea-mattress-pavilion-2019,https://www.archdaily.com/1022484/phula-va-1-plus-x, https://www.archdaily.com/259643/tourner-autour-du-ried-standre-lang-architectes

Obrázok 7-12 **KOLB, Josef. *Systems in Timber Engineering: Loadbearing Structures and Component Layers.*** Basel: Birkhäuser, 2008. Edited by Lignum – Holzwirtschaft Schweiz, Zurich; DGfH – German Society of Wood Research, Munich. ISBN (print): 978-3-7643-8689-4;

[9] ŠPILÁK, Dominik a Ľudmila TEREŇOVÁ. *Stavebné konštrukčné systémy* Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2022. 74 s. ISBN 978-80-228-3350-9. str.86-103

Kamil Hudák[1]
Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, ročník:2.

VEGETAČNÉ FASÁDY: MECHANIZMY TEPELNÉHO PRENOSU A ENERGETICKÉ PRÍNOSY

VEGETATION FACADES: HEAT TRANSFER MECHANISMS AND ENERGY BENEFITS

Abstract
The article summarizes current knowledge on how green facades affect the thermal performance of building envelopes and the energy balance of buildings. It synthesizes the main mechanisms of action—shading, evapotranspiration, accumulation-insulation effect, and air cavity flow—and their impacts on surface temperatures and heat flows in different orientations and seasons. An overview of experimental and simulation studies points to a significant reduction in surface temperatures and heat flows and energy savings for cooling in the order of tens of percent; in winter, the system can provide a slight insulating and wind-protective effect. The extent of the effects depends on the type of system (climbing "green façade" versus modular "living wall"), the thickness and composition of the layers, the distance of the vegetation from the wall, the density of the vegetation, the orientation, the local microclimate, and the irrigation regime.

Kľúčové slová
Vegetačné fasády; Vertikálne zelené systémy (VSG); Tepelná výkonnosť; In-situ hodnotenie

1. Úvod

Vegetačné fasády predstavujú pasívne opatrenie, ktoré ovplyvňuje tepelné pôsobenie obalových konštrukcií prostredníctvom tienenia, evapotranspirácie, zmeny povrchových odporov a prúdenia vo vzduchovej dutine. Tieto mechanizmy upravujú povrchové teploty a tepelné toky cez stenu, čím môžu zmierniť letné prehrievanie a priaznivo ovplyvniť energetickú bilanciu budovy. Popri rastúcom počte prípadových štúdií však naďalej pretrváva potreba zrozumiteľného a porovnateľného reportovania podmienok merania a kvality údajov.

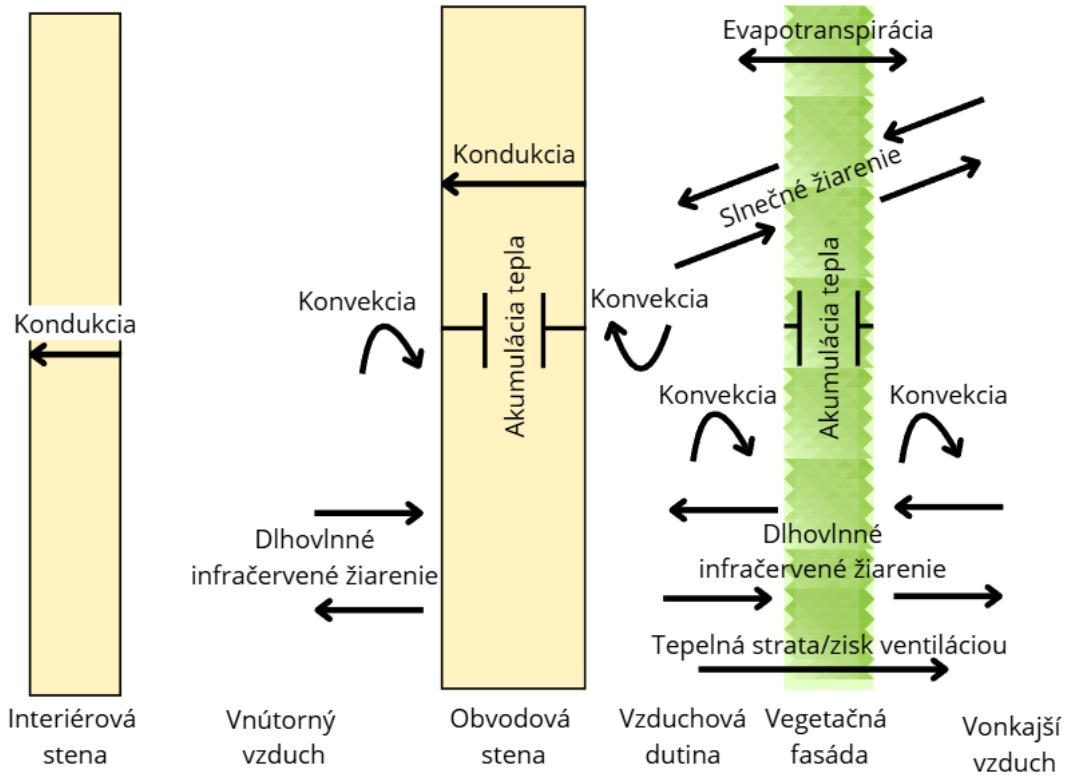
Tento článok systematizuje fyzikálne mechanizmy prenosu tepla vo vertikálnych zelených systémoch a súvisiace parametre vrstvenej skladby (typ systému, vzdialenosť vegetácie od steny, hrúbka a vetranie dutiny, vlastnosti rastového média). Zároveň syntetizuje experimentálne a simulačné poznatky o ich energetických prínosoch: v letných podmienkach býva tepelný tok cez stenu redukovaný často o viac než 70 % a potreba energie na chladenie klesá rádovo v desiatkach percent, kým v zime sa môže uplatniť mierny izolačný a vetro-ochranný účinok. Rozsah účinkov závisí od orientácie, lokálnej mikroklímy, hustoty porastu a režimu závlahy.

[1] Ing. Kamil Hudák, **SvF STU v Bratislave, Radlinského 11, 0810 05 Bratislava**

2. Mechanizmy tepelného prenosu

2.1 Tepelný tok vo vegetačných systémoch

Vo vegetačných fasádach spolupôsobí viacero fyzikálnych mechanizmov, ktoré spôsobujú prenos tepla. Týmito mechanizmami sú kondukcia, konvekcia, radiácia a evapotranspirácia. Priebeh týchto procesov sa vyskytuje v rámci vrstvenej skladby vegetačného systému, ktorý obsahuje vegetáciu, rastové médium (substrát alebo hydrofilná minerálna vlna), vzduchovú medzeru a konštrukciu steny. Ich intenzita závisí od fyzikálnych vlastností jednotlivých materiálov, hrúbky vrstiev, typu vegetácie a klimatických podmienok. Vegetačné systémy majú v modeli energetickej bilancie obvykle definované vrstvy: vegetačná vrstva, vzduchová medzera, vonkajší povrch steny, vnútorný povrch steny a vzduch interiéru. Každá z týchto vrstiev má svoju tepelnú bilanciu (Obr. 1) [1].



Obr. 1 Schematické znázornenie zelenej fasády a energetických tokov pre každý prvok [1]

Mechanizmy prenosu tepla:

Kondukcia

Prenos tepla kondukciou prebieha v rastovom médiu, jeho nosnej vrstve (kvetináč, modul) a v konštrukcii steny. Tento prenos tepla ovplyvňujú najmä hrúbka vrstiev a ich tepelná vodivosť. V modeloch sa popisuje pomocou Fourierovej rovnice [1]. Z nameraných hodnôt môžeme vidieť, že vegetačné systémy majú potenciál zvýšiť tepelný odpor fasády v porovnaní s holou stenou o 0,13 až 0,68 m^2K/W, čím výrazne znižujú prestup tepla vedením [2], a taktiež znížiť povrchovú teplotu exteriérovej steny až o 10,94°C počas letných dní[3]. Tieto rozdiely ukazujú pozitívne účinky aplikácie vegetačných systémov.

Konvekcia

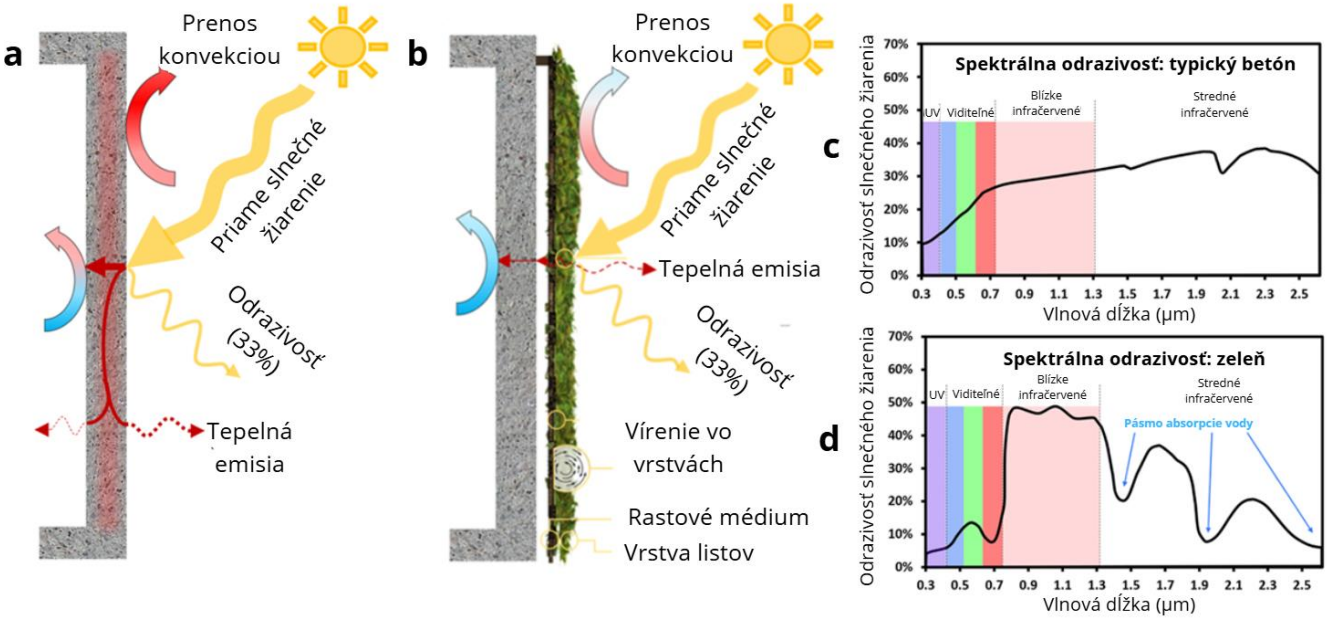
Priebeh konvekcie nastáva najčastejšie v medzerách vrstiev systému. Vegetácia pôsobí ako prirodzený veterný štít a taktiež znižuje turbulentné prúdenie vzduchu pri povrchu steny. To

obmedzuje prestup tepla konvekciou. V modeloch označujeme prenos tepla konvekciou pre vzduch v dutine – vonkajší povrch steny a pre vnútorný povrch steny – vnútorný vzduch) [1] [2].

Radiácia

Radiácia je tok energie vo forme elektromagnetického žiarenia, a to slnečného (krátkovlnného) aj tepelného (dlhovlnného). Vegetácia znižuje povrchovú teplotu fasády a zmierňuje množstvo slnečného žiarenia, ktoré stena absorbuje (Obr. 2). Rozloženie dopadajúcej slnečnej energie ukazuje nasledujúce účinky vegetácie: 5-30% je odrazenej, 5-20% sa využíva na fotosyntézu, 10-50% sa premení na teplo, 5-30% prenikne cez listy a 20-40% sa využije na evapotranspiráciu [4].

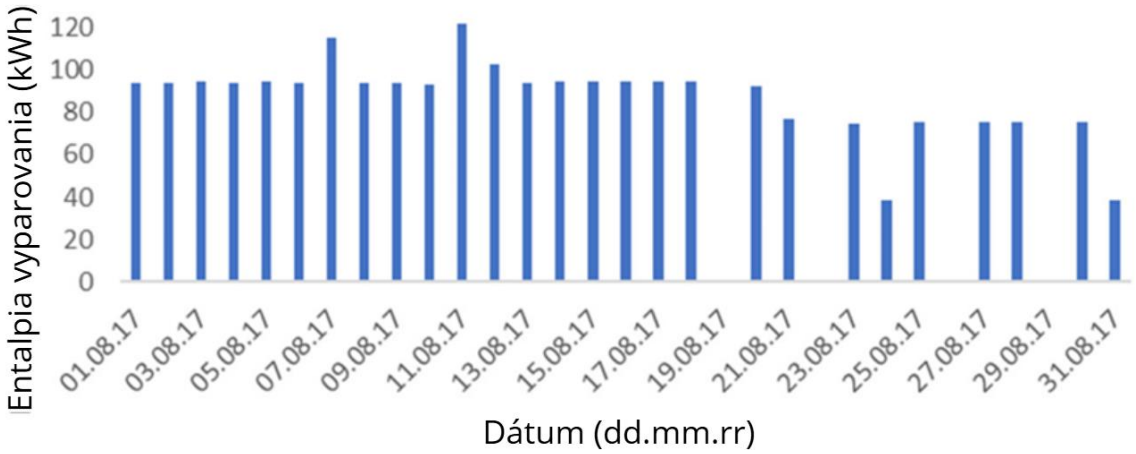
Prestup krátkovlnného slnečného žiarenia cez vegetačný porast sa znižuje približne o 5–10 % pri každej ďalšej vrstve listov; s rastúcim počtom vrstiev tak výrazne klesá radiačný tok dopadajúci na stenu [5].



Obr. 2 Klasická fasáda vs. fasáda s vertikálnou zeleňou (VGS) Mechanizmy tepelnej rovnováhy fasády. (a) Tepelná rovnováha klasickej fasády. (b) Tepelná rovnováha fasády VGS. (c) Spektrálna odrazivosť klasickej fasády. (d) Spektrálna odrazivosť vegetačnej fasády [5]

Evapotranspirácia

Pri evapotranspirácii sa teplo z prostredia využíva na odparovanie vody z listov rastlín a substrátu. Tento proces má výrazný chladiaci účinok a to hlavne počas letných dní s intenzívnym slnečným žiarením. Tento mechanizmus odoberá z okolia latentné teplo výparu potrebné na fázový prechod vody, tým sa ochladzuje povrch fasády aj priľahlý vzduch a znižujú sa tepelné zisky do interiéru [1] [2]. V porovnaní s efektom tieniacej vrstvy, ktorá zabezpečuje približne 60–80 % celkového chladiaceho účinku, evapotranspirácia prispieva v priemere 20–40 %. To samozrejme závisí od mnohých faktorov, no najmä od orientácie fasády, druhu rastlín a zavlažovania [6]. Z meraní uskutočnených na južne orientovanej fasáde s rozlohou približne 58 m2 počas letných mesiacov vyplýva, že chladiaci účinok evapotranspirácie má významný podiel na redukcii teploty budovy vplyvom vegetačného systému. Na Obr. 3 môžeme vidieť, že priemerná denná evaporačná energia dosahovala 64,70 kWh a najvyšší denný výkon bol 121,80 kWh [7].



Obr. 3 Denné priemerné hodnoty energie odparovania (kWh) august 2017. [7]

2.2 Vrstvová skladba vegetačných systémov a jej fyzikálne vlastnosti

Základné rozdelenie vertikálnych zelených systémov je na zelenú fasádu (green facade) a modulárne vegetačné systémy (living wall). Zelená fasáda (Green facade) využíva jednoduchý systém nosnej mriežky alebo lán, ktoré slúžia ako oporná konštrukcia pre popínavé rastliny. Ich koreňový systém sa nachádza priamo v zemi, alebo v kvetináčoch umiestnených na úrovni terénu. Takýto systém zabezpečuje tienenie fasády rastlinnou vrstvou a jej chladiaci účinok závisí hlavne od hustoty vegetácie, vzdialenosti zelene od steny a od orientácie fasády. Sofistikovanejšou verziou sú práve modulárne vegetačné systémy ktoré sa v zahraničnej literatúre označujú ako living wall. Tieto systémy sa skladajú z modulov, ktoré obsahujú rastové médium (substrát v kvetináčoch alebo bloky s hydrofilnou minerálnou vlnou). Moduly sa kotvia priamo na fasádu a obsahujú tiež systém zavlažovania. Tento systém umožňuje súvislé pokrytie celej steny a výraznejšiu interakciu medzi vegetáciou a povrchom, čím sa zvyšuje tienenie, akumulácia tepla a celková tepelná efektivita [3] [7].

Vplyv hrúbky vzduchovej dutiny

Jedným z faktorov, ktorý ovplyvňuje reguláciu mikroklimatických podmienok je veľkosť vzduchovej medzery medzi vegetačným systémom a exteriérovou stenou. Poznatky získané z meraní ukazujú, že menšie hrúbky vzduchových dutín lepšie regulujú teplotu vzduchu v dutine, a taktiež zvyšujú jej vlhkosť. Tabuľka 1 a Tabuľka 2 zobrazujú výsledky 3 experimentov, v ktorých sa medzi sebou porovnávali vždy dve variácie vzdialenosti. V Tabuľke 1 môžeme vidieť porovnávanie vplyvu vzdialenosti na redukciu teploty vzduchovej medzery, zadného povrchu vegetačnej steny a exteriérového povrchu steny. Každý experiment ukazuje rovnaký záver, a to že menšia hrúbka vzduchovej dutiny dokáže lepšie redukovať teplotu. Tabuľka 2 ukazuje, že okrem teploty ovplyvňuje vzdialenosť aj vlhkostný režim. Napríklad pri 30 mm bola relatívna vlhkosť vzduchu v medzere o 4,6 % vyššia než pri 200 mm, a podobný trend sa potvrdil aj pri porovnaní väčších vzdialeností. V každom prípade boli hodnoty vlhkosti vo vzduchovej vrstve vyššie, než vo vonkajšom prostredí, čo zvyšuje efektivitu evapotranspirácie [8].

Tabuľka 1. Denné priemerné teploty vzoriek experimentu 1, experimentu 2 a experimentu 3 [8]

		Vzduchová dutina [°C]	Zadná strana vegetačného systému [°C]	Exteriérový povrch steny [°C]	Okolitý vzduch [°C]
Experiment 1	30 mm	29,76	29,27	29,65	30,9
	200 mm	29,87	29,68	29,69	
Experiment 2	200 mm	26,66	26,28	26,63	28,0
	400 mm	27,09	26,80	26,94	
Experiment 3	400 mm	31,15	30,91	31,04	32,6
	600 mm	31,58	30,93	31,36	

Tabuľka 2. Denná priemerná relatívna vlhkosť vzduchovej dutiny a okolitého vzduchu [8]

	Denná priemerná relatívna vlhkosť [%]			Rozdiel relatívnej vlhkosti medzi dvoma vzduchovými dutinami [%]
Experiment 1	30 mm	200 mm	Okolitý vzduch	4,6
	88,2	83,6	79,9	
Experiment 2	200 mm	400 mm	Okolitý vzduch	0,5
	84,9	84,4	81,1	
Experiment 3	400 mm	600 mm	Okolitý vzduch	2,2
	76,2	74,0	73,8	

Zlepšenie tepelnotechnických parametrov

Ďalšou výhodou inštalácie vegetačného systému je zlepšenie tepelnoizolačných vlastnosti fasády. V experimentálnych meraniach na reálnych objektoch sa preukázalo, že aplikácia modulového systému znížila súčiniteľ prechodu tepla (U-hodnotu) z 1,12 W/(m^2.K) na 0,77 W/(m^2.K), čo predstavuje zlepšenie o 31,4 %. Taktiež došlo k zlepšeniu povrchového tepelného odporu, ktorý sa v prípade použitia exteriérového odvetraného systému, ako je modulárna vegetačná fasáda, zlepšil z hodnoty 0,04 m^2.K/W na 0,1 – 0,13 m^2.K/W, čím sa výrazne obmedzia tepelné straty spôsobené vetrom [2].

Porovnanie dvoch rôznych typov vegetačných fasád ukázalo rozdiely v povrchových teplotách jednotlivých vrstiev. Pri aplikácii modulárneho systému došlo k zníženiu teploty vzduchu vo vzduchovej medzere o 8,0 °C, teploty interiérovej povrchovej vrstvy steny o 4,0 °C a teploty vnútornej vrstvy vegetačného systému o 6,3 °C. Zelená fasáda (Green façade) dosahovala zníženie teploty vzduchu o 6,5 °C a povrchu steny o 3,5 °C (Tabuľka 3) [9].

Tabuľka 3. Redukcia teploty vďaka Living wall a Green facade [9]

	Redukcia teploty vzduchu vo vzduchovej dutine [°C]	Redukcia interiérovej teploty vzduchu [°C]	Redukcia teploty vzduchu v interiéri pri vetraní [°C]	Redukcia teploty povrchu vo vzduchovej dutine [°C]	Redukcia teploty povrchu v interiéri [°C]
Modulárny vegetač. systém (Living wall)	8,0	4,0	3,5	6,3	4,0
Zelená fasáda (Green facade)	6,5	3,0	2,5	5,5	3,5

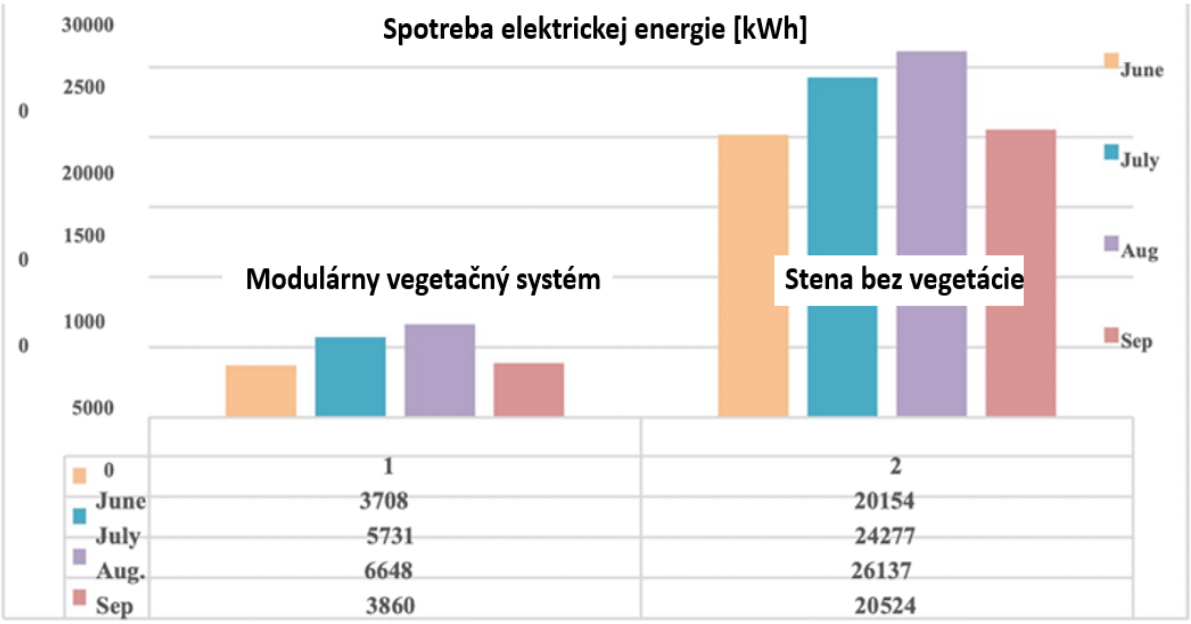
Rozdelenie solárneho žiarenia a redukcia tepelného toku

Merania realizované na historickej budove knižnice Tsinghua University v Pekingu ukázali, že tradičná vegetačná fasáda pokrytá brečtanom (*Hedera helix*) s hrúbkou porastu 10 cm výrazne znižuje teplotné zaťaženie steny. Denné solárne žiarenie dosahovalo 189 W/m², z čoho 27,9 W/m² sa odrazilo, 28 W/m² preniklo cez listy a 133 W/m² bolo absorbovaných. Z absorbovanej energie sa 42 % odviedlo transpiráciou, 40 % konvekciou a 18 % dlhovlnným sálaním smerom k stene. Povrchová teplota pod vegetáciou bola v priemere nižšia o 8,2 °C, pričom maximálny rozdiel dosiahol 16 °C [10].

Tieto výsledky taktiež potvrdzujú merania zo Singapuru, kde vegetačný panelový systém znížil tepelný tok cez stenu z viac ako 40 W/m² na hodnoty pod 10 W/m², čo predstavuje redukciu o viac než 75 %. Podobné hodnoty boli zaznamenané aj v talianskom meste Lonigo, kde sa tepelný tok znížil z 90–100 W/m² na 18–30 W/m², čo predstavuje redukciu o 70–80 %. Na základe týchto údajov možno konštatovať, že vegetačné fasády dokážu počas letných dní znížiť tepelný tok zo solárneho žiarenia cez stenu o viac než 70 %, v závislosti od klimatických podmienok, typu systému a vlastností vegetačnej vrstvy [10].

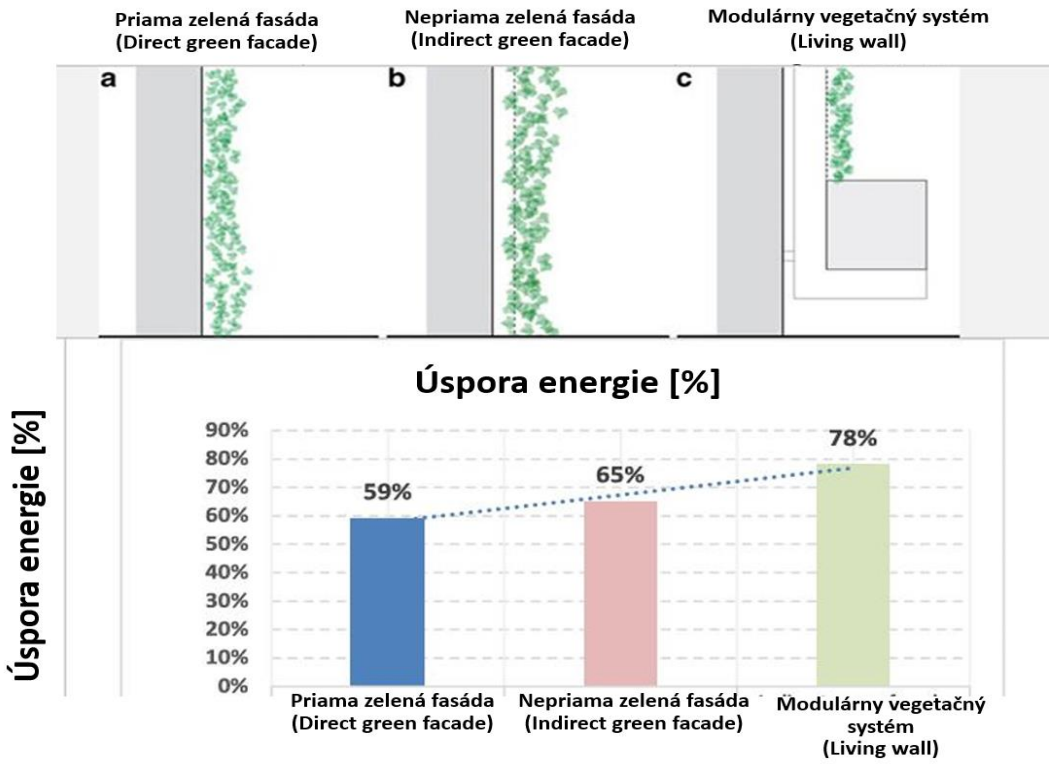
2.3 Energetická bilancia vegetačných fasád

Pomocou simulačných nástrojov DesignBuilder a EnergyPlus bola analyzovaná energetická spotreba budovy s vegetačnou fasádou v meste New Cairo (Egypt). Testoval sa modulárny systém (living wall) s planter boxami. Výsledky ukázali, že v letných mesiacoch jún až september sa spotreba energie na chladenie znížila v priemere o 75 % v porovnaní s referenčnou budovou bez vegetácie (Obr. 4). Tento významný rozdiel bol spôsobený najmä účinným tienením a znížením solárneho zisku cez obvodový plášť [7].



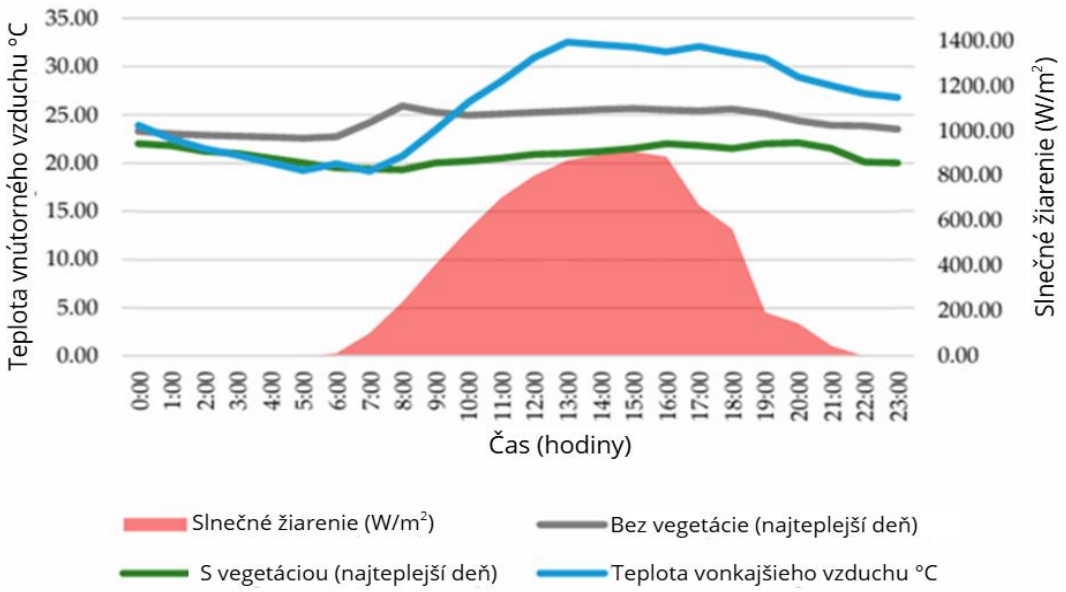
Obr. 4 Porovnanie modifikovaného modelu s modulárnym vegetačným systémom a pôvodného modelu z hľadiska elektrickej záťaže [7]

Ďalšia simulácia porovnala tri typy vegetačných systémov: priamej zelenej fasády (direct green façade), nepriamej zelenej fasády (indirect green façade) a modulárneho vegetačného systému (living wall). Najvyššiu účinnosť z hľadiska celkovej úspory energie priniesol posledný z nich, s úsporou až 78 % na juh orientovanej fasáde, v porovnaní s 65 % a 59 % pri ostatných typoch (Obr. 5) [7].



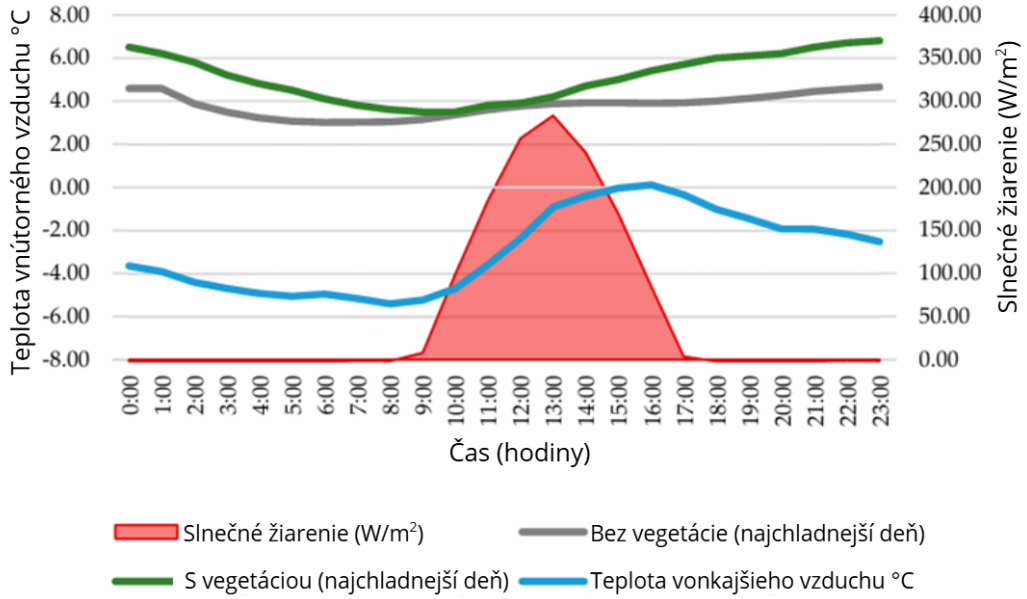
Obr. 5 Výsledky simulácii zelených stien. a) priama zelená fasáda, b) nepriama zelená fasáda, c) modulárny vegetačný systém [7]

V oblasti juhu Španielska prebehli experimentálne a simulačné štúdie na testovacích bunkách, v ktorých sa porovnávala energetická náročnosť budov s vegetačnými fasádami rôzneho typu v letnom aj zimnom období. V letnom období dosiahla stena so zelenou fasádou (green wall) zníženie potreby energie na chladenie o 33,8 %. Modulárny vegetačný systém (living wall) dosiahol úsporu až o 58,9 %, pričom vo všetkých prípadoch bola udržiavaná interiérová 24 °C. Okrem úspory energie bol počas najteplejších dní zaznamenaný pokles vnútornej teploty o 3–4 °C v miestnosti s vegetáciou (Obr. 6) [11].

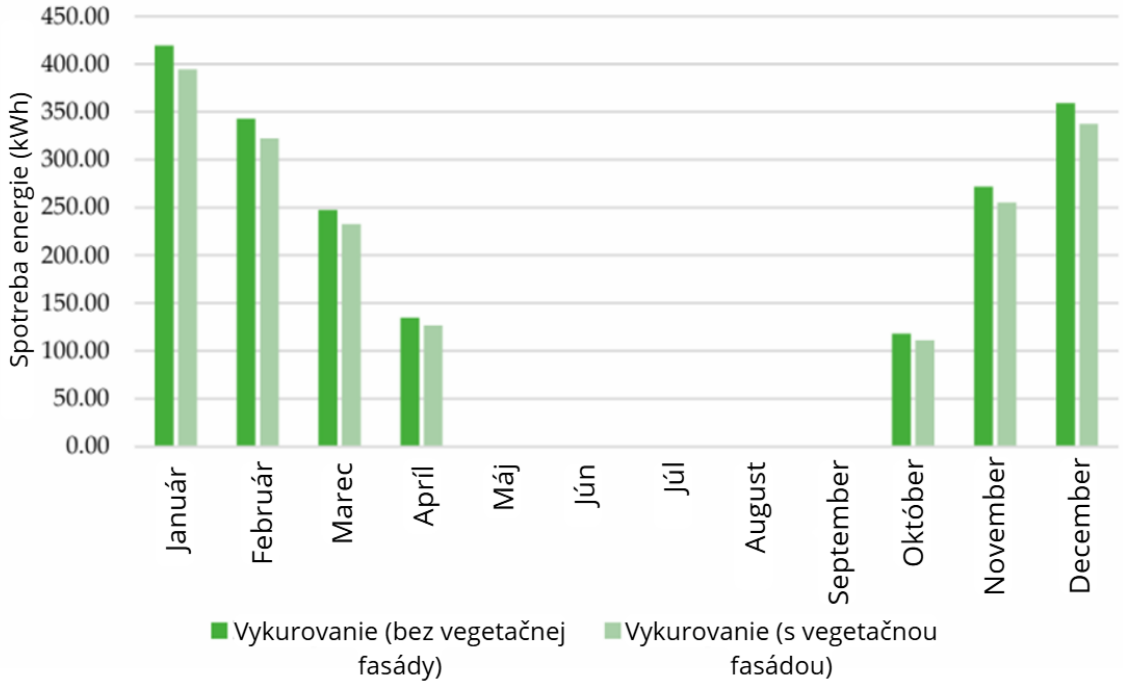


Obr. 6 Prevádzková teplota v interiéri v obývacej izbe s a bez zelenej steny (8. júl) [11]

Počas najchladnejšieho dňa v roku (10. január) sa interiérová teplota v miestnosti s vegetačnou fasádou zvýšila až o 1,3 °C, čo poukazuje na izolačný efekt systému (Obr. 7). Zároveň bola nameraná ročná úspora energie na vykurovanie približne 6 % (Obr. 8) [11].



Obr. 7 Prevádzková teplota v interiéri v obývacej izbe s a bez zelenej steny (10. január) [11]



Obr. 8 Mesačná spotreba energie na vykurovanie budovy (kWh) [10]

Na základe uvedených prípadových štúdií možno konštatovať, že vegetačné fasády majú výrazný vplyv na zníženie potreby energie na chladenie v teplých podnebiach a zároveň môžu mierne zlepšiť tepelné podmienky aj počas chladnejších období. Výsledky sa líšia v závislosti od: typu vegetačného systému (green façade vs. living wall), orientácie steny, lokálnej klímy, spôsobu montáže a hrúbky systému. Tieto poznatky poskytujú dôkaz, že vegetačné fasády nie sú len estetickým doplnkom, ale

aj funkčným riešením pre zvýšenie energetickej efektívnosti budov v rôznych klimatických podmienkach [10] [11].

3. Záver

Vegetačné fasády predstavujú účinný pasívny prvok zlepšujúci tepelno-energetickú bilanciu budov. Súbeh tienenia, kondukcie, konvekcie, radiácie a evapotranspirácie mení povrchové teploty a tepelné toky cez obalové konštrukcie, čím sa znižuje potreba mechanického chladenia (najmä v lete) a v niektorých prípadoch sa priaznivo ovplyvňuje aj zimná prevádzka. Veľkosť účinku závisí od orientácie a mikroklímy, miery zakrytia, režimu závlahy a prúdenia v dutine medzi vegetáciou a stenou, pri nevhodných podmienkach môžu znížené solárne zisky či vlhkosť účinok naopak tlmiť.

Efektivita riešenia je podmienená parametrami systému: typom (popínavá „green façade“ verzus modulová „living wall“), hrúbkou a skladbou vrstiev, vzdialenosťou vegetácie od steny, vlastnosťami rastového média a vetraním dutiny. Experimentálne aj simulačné práce opakovane potvrdzujú zníženie povrchových teplôt a tepelných tokov, v priaznivých letných podmienkach sa v literatúre uvádzajú úspory energie na chladenie až v desiatkach percent, zatiaľ čo v zime sa môže prejaviť izolačný a vetro-ochranný účinok systému.

4. Zdroje

[1] CONVERTINO, F. – VOX, G. – SCHETTINI, E.: Heat transfer mechanisms in vertical green systems and energy balance equations. International Journal of Design & Nature and Ecodynamics [online]. 2019, roč. 14, č. 1, s. 7–18 [cit. 11.11.2025]. ISSN 1755-7437. Dostupné na: https://doi.org/10.2495/DNE-V14-N1-7-18

[2] FOX, M. – MOREWOOD, J. – MURPHY, T. – LUNT, P. – GOODHEW, S.: Living wall systems for improved thermal performance of existing buildings. Building and Environment [online]. 2022, roč. 207, s. 108491 [cit. 11.11.2025]. ISSN 0360-1323. Dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108491

[3] WONG, N. H. – TAN, A. Y. K. – CHEN, Y. – SEKAR, K. – TAN, P. Y. – CHAN, D. CHIANG, K. – WONG, N. C.: Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. Building and Environment [online]. 2010, roč. 45, č. 3, s. 663–672 [cit. 11.11.2025]. ISSN 0360-1323. Dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.005

[4] OTTELÉ, M. – PERINI, K. – FRAAIJ, A. L. A. – HAAS, E. M. – RAITERI, R.: Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. Energy and Buildings [online]. 2011, roč. 43, č. 12, s. 3419–3429 [cit. 11.11.2025]. ISSN 0378-7788. Dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.010

[5] SHAH, I. – LAU, S.-K. – SEKARAN, V. – GHAHRAMANI, A.: Porous plant form-induced amplification of evapotranspiration for enhanced cooling in vertical greenery systems. Building and Environment [online]. 2023, roč. 245, s. 110904 [cit. 11.11.2025]. ISSN 0360 1323. Dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110904

[6] BAKHSHOODEH, R. – OCAMPO, C. – OLDHAM, C.: Evapotranspiration rates and evapotranspirative cooling of green façades under different irrigation scenarios. Energy and Buildings [online]. 2022, roč. 270, s. 112223 [cit. 11.11.2025]. ISSN 0378-7788. Dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112223

[7] RAMADHAN, A. M. – MAHMOUD, A. H.: Evaluating the efficiency of a living wall facade as a sustainable energy-saving alternative in hot arid regions. Journal of Engineering and Applied Science [online]. 2023, roč. 70, s. 96 [cit. 11.11.2025]. ISSN 2536-9512. Dostupné na: https://doi.org/10.1186/s44147-023-00259-9

[8] CHEN, Q. – LI, B. – LIU, X.: Cooling effects of the living wall system at different distances to the wall. International Journal of Environmental Sustainability [online]. 2013, roč. 9, s. 67–77 [cit. 11.11.2025]. ISSN 2325-1077. Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/286379887_Cooling_effects_of_the_living_wall_system_at_different_distances_to_the_wall

[9] SAFIKHANI, T. – ABDULLAH, A. M. – OSSEN, D. R. – BAHARVAND, M.: Thermal Impacts of Vertical Greenery Systems. Environmental and Climate Technologies [online]. 2014, roč. 14, s. 5–11 [cit. 11.11.2025]. ISSN 1691-5208. Dostupné na: https://doi.org/10.1515/rtuect 2014-0007

[10] PÉREZ, G. – COMA, J. – MARTORELL, I. – CABEZA, L. F.: Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 2014, roč. 39, s. 139–165 [cit. 11.11.2025]. ISSN 1364-0321. Dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.055

[11] RADUJKOVIC, M. – VERSELE, A. – BREESCH, H.: Exploratory Analysis of a Novel Modular Green Wall's Impact on Indoor Temperature and Energy Consumption in Residential Buildings: A Case Study from Belgium. Energies [online]. 2024, roč. 17, č. 21, s. 5267 [cit. 11.11.2025]. ISSN 1996-1073. Dostupné na: https://doi.org/10.3390/en17215267

Patrícia Jánošková[1]
Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb D-TKPS4, 3. ročník

VPLYV VONKAJŠÍCH MATERIÁLOV NA VNÚTORNÚ TEPLOTU

THE INFLUENCE OF EXTERIOR MATERIAL ON INDOOR TEMPERATURE

Abstract

The growing threat of global warming and the urban heat island effect leads to increasing temperatures in cities and the overheating of buildings. The selection of surface materials and their properties, such as emissivity, reflectivity, and albedo, significantly influences the thermal balance of buildings and the energy demand for cooling and heating. Low-emissivity materials applied to exterior building surfaces (such as façades, consoles, or window frames) reduce summer heat gains by reflecting solar radiation and limit winter heat losses by emitting less heat to the cold exterior. Effective temperature reduction through surface design can be further supported by combining suitable materials with passive strategies, such as adaptive shading or vegetation, which improve the overall energy efficiency and thermal comfort of buildings under changing climatic conditions.

Kľúčové slová / Key Words
Prehrievanie / Overheating; pasívne chladenie / passive cooling; emisivita / emissivity

1. Úvod

Narastajúca hrozba globálneho otepľovania a klimatických zmien zvýšila povedomie o ekonomických nákladoch na spotrebu energie [1]. Rastúce teploty budú mať výrazný vplyv na energetickú potrebu, najmä v sektore chladenia budov. Počet klimatizačných jednotiek v Európe sa zvýšil zo 14 % v roku 2010 na približne 20 % v roku 2019 (databáza Odyssee), pričom dopyt naďalej rastie so zvyšujúcimi sa teplotami. Klimatizácia je v súčasnosti dominantnou stratégiou chladenia pre firmy aj domácnosti, ktoré si ju môžu dovoliť, napriek jej nevýhodám. Používanie klimatizačných jednotiek a reverzibilných tepelných čerpadiel prispieva ku klimatickým zmenám dvomi spôsobmi – po prvé, spotrebou elektrickej energie, ktorej výroba emituje CO_2, a po druhé, únikom chladív, ktoré obsahujú fluórované uhľovodíky [2].

V reakcii na tieto výzvy je nevyhnutné zamerať sa na udržateľné pasívne stratégie navrhovania budov, ktoré dokážu obmedziť prehrievanie interiérov bez dodatočnej energetickej záťaže. Cieľom integrácie pasívnych systémov je dosiahnuť vysokoúčinnú tepelnú pohodu a prirodzené osvetlenie s využitím prírodných prvkov, ako sú slnko, vietor, zem a voda. Tepelný zisk alebo strata vznikajú v dôsledku prieniku slnečného žiarenia cez nepriehľadné i transparentné konštrukcie, vedením tepla cez obalové materiály a konvekciou pri výmene vzduchu medzi interiérom a exteriérom [3].

Pasívne systémy, ako sú tienenia, arkády, solárne komíny, nádvoria či veterné veže, dokážu efektívne znížiť potrebu aktívneho chladenia. Riziko prehrievania v chladnom a miernom podnebí je ovplyvnené vonkajšou teplotou vzduchu a intenzitou slnečného žiarenia, ale aj vlhkosťou a rýchlosťou vetra [4].

[1] Patrícia Jánošková, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Zvýšené riziko prehrievania je obzvlášť výrazné v mestskom prostredí vplyvom efektu mestského tepelného ostrova[2] *(Obr.1),* keď mestá vykazujú podstatne vyššie teploty ako okolité vidiecke oblasti.

Obr.1: Mestský tepelný ostrov [5].

Medzi hlavné faktory prispievajúce k UHI patrí energetická bilancia povrchu – absorpcia a emisia slnečného a infračerveného žiarenia – ako aj antropogénne teplo pochádzajúce z ľudskej činnosti, najmä z budov, dopravy a priemyslu [5]. Tieto procesy vedú k intenzívnej akumulácii tepla v zastavanom prostredí, čo spôsobuje zhoršenie tepelnej pohody, zvýšenie spotreby energie a negatívne zdravotné dôsledky.

Z tohto dôvodu je potrebné už v počiatočných fázach projektovania budov hľadať jednoduché, energeticky efektívne a realizovateľné prístupy na elimináciu prehrievania. Popri správnej orientácii, tienení a dispozícii budovy zohrávajú významnú úlohu aj povrchové materiály – ich tepelná vodivosť, farba, odrazivosť a emisivita ovplyvňujú teplotné podmienky v interiéri aj exteriéri.

2. Slnečné žiarenie a sálanie

Tepelné sálanie sa vyskytuje najmä v infračervenej oblasti spektra (100 nm – 10^5 nm), ktorá je zodpovedná za tepelné účinky slnečného žiarenia.

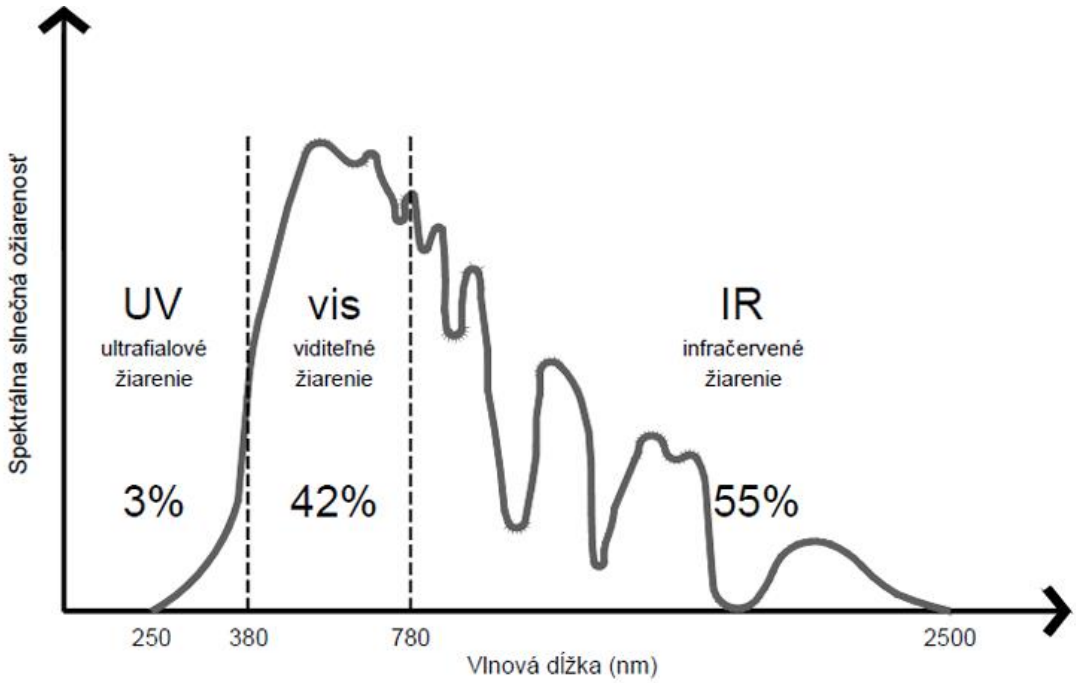
Slnečné žiarenie je elektromagnetické žiarenie, ktoré obsahuje široké spektrum vlnových dĺžok. Priemerná intenzita slnečného žiarenia mimo atmosféry je približne 1370 W/m², pričom vzhľadom na eliptickú obežnú dráhu Zeme okolo Slnka táto hodnota počas roka mierne kolíše. Po prechode atmosférou sa jeho intenzita znižuje a mení sa aj spektrálne zloženie *(Obr.2)*:

- ultrafialové žiarenie (UV) – 100 až 380 nm, má biologické účinky (poškodenie pokožky, očí, urýchlenie starnutia),
- viditeľné svetlo – 380 až 780 nm, vnímané ľudským okom,
- infračervené žiarenie (IR) – 780 až 2500 nm, ktoré spôsobuje tepelné účinky.

Po prechode atmosférou časť žiarenia odrážajú častice a oblaky, časť sa rozptyľuje a časť absorbuje, pričom len určitá časť dopadá priamo na zemský povrch [6]. Rozlišujú sa tri hlavné zložky:

- priame slnečné žiarenie, ktoré dopadá v podobe paralelných lúčov a vrhá ostré tiene,
- difúzne (rozptýlené) žiarenie, ktoré prichádza zo všetkých smerov oblohy,
- odrazené (reflexné) žiarenie, ktoré vzniká odrazom od okolitých povrchov, najmä v oblastiach s vysokým albedom[3].

[2] Mestský tepelný ostrov – angl. Urban heat island, UHI
[3] Albedo – pomer odrazenej energie k dopadajúcej energii, udáva sa ako bezrozmerné číslo od 0 do 1 (alebo v percentách).



Obr.2: Spektrálne slnečné žiarenie v podmienkach jasnej oblohy na úrovni hladiny mora [6].

3. Emisivita a správanie materiálov povrchov

Keď slnečné žiarenie dopadá na povrch konštrukcie, časť energie sa pohlcuje ($\Phi\alpha$), časť sa odráža ($\Phi\rho$) a zvyšok môže prechádzať ($\Phi\tau$) materiálom. Súčet týchto podielov je rovný jednej ($\alpha + \rho + \tau = 1$). Pomer medzi nimi závisí od fyzikálnych vlastností materiálu, povrchovej úpravy, farby a teploty.

Schopnosť povrchu vyžarovať sálavú energiu vyjadruje emisivita (ε), ktorej hodnota je vždy menšia ako 1. Materiály s vysokou pohltivosťou zároveň dobre sálajú, zatiaľ čo povrchy s vysokou odrazivosťou (napr. svetlé alebo kovové) majú nízku emisivitu a vyžarujú menej tepla. Farba a povrchová štruktúra teda výrazne ovplyvňujú správanie stavebných materiálov pri pôsobení slnečného žiarenia.

Svetlé a lesklé povrchy absorbujú menej energie, zatiaľ čo tmavé a matné povrchy pohlcujú viac tepla. Napríklad náter s obsahom hliníkového bronzu má nižšiu emisivitu než bežné farebné nátery. Tieto rozdiely v emisivite a odrazivosti (viac v *Tab.1)* majú zásadný vplyv na teplotu povrchu konštrukcie a následne aj na tepelnú pohodu v interiéri [7].

Na správanie sa mestských povrchov majú zásadný vplyv fyzikálne veličiny ako albedo a emisivita, ktoré určujú schopnosť materiálu odrážať a vyžarovať teplo. Zvýšenie albeda o 10 – 25 % môže viesť k poklesu povrchovej teploty približne o 0,5 °C [8]. Albedo ovplyvňuje najmä maximálne denné teploty, zatiaľ čo emisivita má väčší vplyv na nočné ochladzovanie. Svetlé a reflexné povrchy znižujú prehrievanie počas dňa, zatiaľ čo tmavé povrchy akumulujú teplo a uvoľňujú ho v noci.

Okrem fyzikálnych vlastností materiálov zohráva významnú úlohu aj zeleň v okolí budov *(Obr.3)*. Stromy a vegetácia znižujú teplotu prostredníctvom evapotranspirácie, pri ktorej sa voda premieňa na paru a odoberá teplo z okolitého vzduchu. Zeleň zároveň poskytuje tienenie, znižuje dopad priameho slnečného žiarenia a zlepšuje mikroklimatické podmienky [7, 9]. Zelené strechy a fasády predstavujú ekologické riešenie, ktoré prispieva k znižovaniu tepelného zaťaženia budov, zlepšuje kvalitu ovzdušia a zvyšuje estetickú hodnotu prostredia.

Obr.3: Spoločnosť Liko-s [10].

Tab.1: Súčiniteľ sálania, emisivita a odrazivosť žiarenia [7].

Materiál	**C.10⁸** W/(m².K⁴)	**ε** (-)	**ρ** (-)
Hliník			
leštený	0,30	0,05	0,95
drsný	0,39	0,07	0,93
oxidovaný	1,14 až 1,71	0,2 až 0,3	0,8 až 0,7
Plech			
pozinkovaný	4,31	0,23	0,77
Oceľ			
valcovaná	4,38	0,77	0,23
Stavebné materiály			
betón	5,11	0,89	0,11
pálené tehly	5,29	0,93	0,07
drevo	5,12	0,90	0,10
mramor	5,29	0,93	0,07
žula	2,40	0,42	0,58
sklo	5,23	0,92	0,08

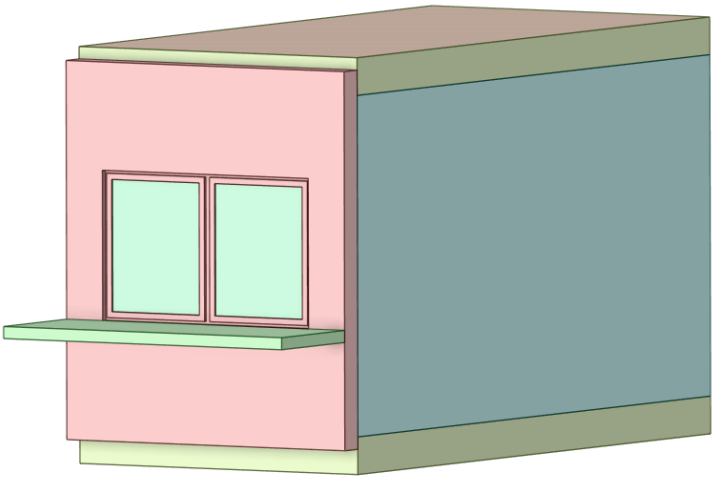
4. Simulácia vplyvu povrchov v programe Ansys

ANSYS [11] Fluent (modul Fluid Flow with Fluent Meshing[4]) je numerický nástroj založený na metóde konečných objemov (Finite Volume Method – FVM), ktorý umožňuje analyzovať prenos tepla, prúdenie vzduchu a sálanie v rôznych prostrediach.

Cieľom simulácie je porovnať vplyv povrchového materiálu konzoly umiestnenej pod oknom na tepelnú bilanciu miestnosti v letnom období. Model predstavuje jednoduchú výpočtovú bunku *(Obr.4)* – miestnosť s rozmermi 2,5 × 5,5 × 2,8 m s jedným oknom orientovaným na juh. Pod oknom je umiestnená konzola so šírkou 1 m, ktorá simuluje vplyv horizontálnej plochy na odrazené slnečné

[4] modul Fluid Flow with Fluent Meshing – simulácia prúdenia tekutín s generovaním siete

žiarenie smerom do interiéru. Vlastnosti materiálov sú priradené ku zjednodušeným konštrukciám: a) podlaha, strop, konzola (železobetón), b) sadrokartónová priečka, c) ľahký obvodový plášť (ĽOP) (sdk, IsoverFassil, hliník), d) transparentná konštrukcia – izolačné trojsklo – Uokno = 0,85 W/(m2.K), viac o materiáloch v *Tab.2.*



Obr.4: Model v Ansyse [autor].

Tab.2: Vlastnosti materiálov [autor].

Materiál	**Hrúbka** m	**Objemová hmotnosť** ρ kg/m3	**Tepelná vodivosť** λ W/(m.K)	**Merná tepelná kapacita** c J/(kg.K)
Železobetón	0.200	2300	1.220	1020
SDK	0.0125	750	0.150	1060
Isover Fassil	0.180	50	0.038	800
Hliník	0.0015	2700	160	880

Model zahŕňa fluidné zóny reprezentujúce vzduch v interiéri aj exteriéri, pričom okrajové podmienky typu inlet sú použité na stanovenie teploty vzduchu, 308,15 K (35 °C). Ostatné hraničné plochy sú definované ako wall s rôznym charakterom – rozhrania medzi vzduchom a konštrukciami sú nastavené ako coupled (konjugovaný prestup tepla medzi vzduchom a pevným materiálom), zatiaľ čo bočné a horné steny predstavujúce pokračovanie budovy sú uvažované ako adiabatic (bez tepelného toku).

Výpočtová sieť typu poly-hexcore je vytvorená v module Fluent Meshing s lokálnym zjemnením v oblasti fasády a konzoly. Na riešenie je použitý model rovnice energie (Energy Equation), ktorý zahŕňa prenos tepla vedením, konvekciou a sálaním. Radiačný prestup tepla je riešený pomocou modelu Discrete Ordinates (DO), ktorý umožňuje simulovať výmenu žiarenia medzi pevnými povrchmi aj prostredníctvom fluidného prostredia.

Slnečné žiarenie je typu Solar Irradiation[5] s hodnotami – priame slnečné žiarenie = 950 W/m² a difúzne žiarenie = 150 W/m². Výpočet vychádza z reálnych podmienok dňa 21. júna o 13:00 pre geografické súradnice 48,15° N a 17,1° E (stredná Európa) pri jasnom počasí.

[5] angl. Solar Irradiation – množstvo slnečnej energie dopadajúcej na povrch (v jednotkách W/m²)

Povrchová úprava konzoly pozostáva z dvoch variantov – hliník alebo betón. Hliník má nastavenú emisivitu ε = 0,05 (odrazí sa 95 % dopadajúceho žiarenia) a difúznu zložku = 0,1 (určuje spôsob rozptylu odrazeného žiarenia, iba 10 % sa rozptýli difúzne, a 90 % sa odrazí zrkadlovo), čím predstavuje vysoko reflexný povrch s nízkou schopnosťou pohlcovať teplo. Betón má emisivitu ε = 1 a difúznu zložku = 1 (odrazené žiarenie sa rozptýli rovnomerne do všetkých smerov), čím je simulovaný ako úplne matný a absorbujúci povrch. Emisivita je v simulácii zjednodušená pre účely porovnania dvoch kontrastných materiálov – reflexného hliníkového a absorbujúceho betónového povrchu. V simulácii sa sleduje správanie povrchov pri dopade slnečného žiarenia – teda pomer odrazeného, pohlteného tepla a ich vplyv na teplotu interiéru.

V letnom výpočtovom režime sa na exteriérovej konzole, v rezovej rovine xy (1/4 miestnosti), vzduch na podlahe a vzduch na strope, sleduje maximálna teplota vnútorného vzduchu. Cieľom numerickej simulácie je izolovať vplyv rozdielnych povrchových vlastností materiálov konzoly (najmä emisivity a odrazivosti) na teplotu vzduchu v interiéri. Model nezohľadňuje komplexné tepelno-technické posúdenie obalových konštrukcií, ale je zjednodušený.

Pri použití konzoly s povrchovou úpravou hliníka dosahuje teplota v interiéri vyššiu teplotu ako pri betónovej konzole v priemere o 0,97 °C (viac v *Tab.3).* Tento rozdiel, hoci je relatívne malý, potvrdzuje, že materiál konzoly umiestnenej pod oknom ovplyvňuje tepelnú bilanciu interiéru. Hliník s nízkou emisivitou (ε = 0,05) a vysokou odrazivosťou odráža časť dopadajúceho slnečného žiarenia smerom k zaskleniu a do interiéru, čím mierne zvyšuje tepelné zaťaženie miestnosti. Betónová konzola s vysokou emisivitou (ε = 1) naopak väčšiu časť žiarenia absorbuje a premieňa na teplo, ktoré sa čiastočne vyžaruje späť do exteriéru. Aj keď je rozdiel teploty relatívne malý, výsledok poukazuje na to, že povrchové vlastnosti konzoly môžu mať pri väčšom rozsahu alebo opakovaní prvkov na fasáde kumulatívny vplyv na tepelnú bilanciu priestoru.

Tab.3: Teplota vzduchu [autor].

Miesto	**Teplota vzduchu** °C	
	Betónový povrch	*Hliníkový povrch*
Ext. konzola	35,16	35,01
Int. XY	34,85	35,79
Int. vzduch podlaha	34,78	35,87
Int. vzduch strop	34,81	35,85

Pri použití exteriérového tienenia, napríklad vonkajších žalúzií, by však mohol mať reflexný povrch konzoly pozitívny účinok. Žalúzie by zabránili dopadu odrazeného žiarenia z hliníkového povrchu na zasklenie, a vďaka vysokej odrazivosti materiálu by sa žiarenie rozptýlilo späť do exteriéru. Tým by sa predišlo hromadeniu tepla v priestore pred oknom a celkovo by sa zvýšila účinnosť tienenia pri znižovaní prehrievania interiéru.

5. Záver

Znižovanie prehrievania interiérov predstavuje kľúčový aspekt udržateľného navrhovania budov v kontexte klimatických zmien. Povrchové materiály, ich emisivita a odrazivosť, spolu s vhodným návrhom pasívnych opatrení, majú zásadný vplyv na tepelnú bilanciu budovy. Materiály s nízkou emisivitou a vysokou odrazivosťou, ako napríklad eloxovaný hliník, pri vhodnom umiestnení prispievajú k zníženiu tepelného zaťaženia počas leta, keďže odrážajú časť dopadajúceho žiarenia a obmedzujú prehrievanie povrchov. Ich účinnosť však závisí od orientácie a geometrie prvkov, keďže odrazené žiarenie môže v niektorých prípadoch smerovať do interiéru a zvýšiť jeho

teplotu. V zimnom období sú výhodné materiály s nižšou emisivitou, ktoré obmedzujú tepelné straty sálaním a pomáhajú udržiavať teplo v interiéri.

Z hľadiska širších environmentálnych súvislostí povrchové materiály ovplyvňujú aj vznik a intenzitu mestského tepelného ostrova. Materiály s vysokou odrazivosťou a nízkou emisivitou znižujú povrchové teploty a obmedzujú akumuláciu tepla v mestskom prostredí, zatiaľ čo materiály s nízkym albedom a vysokou tepelnou kapacitou, ako betón, absorbujú slnečné žiarenie a uvoľňujú ho postupne počas noci, čím zvyšujú teplotu okolitého prostredia.

Z hľadiska celoročnej energetickej efektívnosti je preto nevyhnutné uplatňovať komplexný prístup – kombináciu vhodne zvolených povrchových materiálov, adaptívneho tienenia a zelene, ktoré spoločne prispievajú k zníženiu spotreby energie, zmierneniu efektu mestského tepelného ostrova a zvýšeniu tepelného komfortu v budovách.

Literatúra

[1] Liu Yang, Haiyan Yan, Joseph C. Lam, Thermal comfort and building energy consumption implications – A review, Applied Energy, Volume 115, 2014, Pages 164-173, ISSN 0306-2619, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.062.
[2] Stéphane Quefelec (EEA). Briefing no. 20/2022, Title: Cooling buildings sustainably in Europe: exploring the links between climate change mitigation and adaptation, and their social impacts, EN HTML: TH-AM-22-022-EN-Q - ISBN: 978-92-9480-511-9 - ISSN: 2467-3196 - doi: 10.2800/61355 EN PDF: TH-AM-22-022-EN-N - ISBN: 978-92-9480-512-6 - ISSN: 2467-3196 - doi: 10.2800/36810
[3] A.Y. Freewan A (2019) Advances in Passive Cooling Design: An Integrated Design Approach. Zero and Net Zero Energy. IntechOpen. Available at: http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.87123.
[4] Jonathon Taylor, Robert McLeod, Giorgos Petrou, Christina Hopfe, Anna Mavrogianni, Raúl Castaño-Rosa, Sofie Pelsmakers, Kevin Lomas, Ten questions concerning residential overheating in Central and Northern Europe, Building and Environment, Volume 234, 2023, 110154, ISSN 0360-1323, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110154.
[5] Ziaeemehr B, Jandaghian Z, Ge H, Lacasse M, Moore T. Increasing Solar Reflectivity of Building Envelope Materials to Mitigate Urban Heat Islands: State-of-the-Art Review. *Buildings*. 2023; 13(11):2868. https://doi.org/10.3390/buildings13112868
[6] Hraška, Jozef. Tieniaca technika budov: typológia, navrhovanie a hodnotenie. 1. vyd. Bratislava: Spektrum STU, 2020. 102 s. Ed. č. 6049. ISBN 978-80-227-5006-6.
[7] Chmurný, Ivan. Tepelná ochrana budov. 1. vyd. Bratislava: Jaga, 2003. 254 s. ISBN 80-88905-27-3.
[8] https://www.klimaspaja.sk/klimaticke-prvky/
[9] Thácia Danily de Oliveira Santos, Fernando António Leal Pacheco, Luís Filipe Sanches Fernandes, A systematic analysis on the efficiency and sustainability of green facades and roofs, Science of The Total Environment, Volume 932, 2024, 173107,ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173107.
[10] https://www.liko-s.sk/
[11] https://www.ansys.com/

***Tomáš Kadlec*[1]**
Študijný program: D-TKPS4, ročník: 2

MODRO-ZELENÉ OPATRENIA AKO SÚČASŤ URBANISTICKÉHO NÁVRHU VEREJNÝCH PRIESTOROV

BLUE-GREEN MEASURES AS PART OF THE URBAN DESIGN OF PUBLIC SPACES

Abstract
Public space, or more precisely its physical manifestation - the public realm - represents the environment within settlements where people interact with one another through various forms of social exchange. At the same time, it constitutes one of the most important structural elements of the urban fabric. Therefore, it is essential that such an environment is not only functional, safe, and attractive, but also comfortable and natural. A significant advantage arises when it is able to incorporate elements and tools that enhance its resilience to challenges associated with climate change. The most crucial concept in this regard is the strategic design of the urban environment through the implementation of green-blue infrastructure (GBI). Numerous measures within GBI can not only increase the resilience of cities to adverse environmental phenomena but also improve the overall quality and character of the urban settlement.

Kľúčové slová / Key Words
verejný priestor; mestské prostredie, modro-zelená infraštruktúra; modro-zelené opatrenia; opatrenia založené na prírode; európska legislatíva

1. Teoretické východiská: verejný priestor a modro-zelená infraštruktúra

Pojem **verejný priestor** definuje zákon 200/2022 Z. z. – Zákon o územnom plánovaní ako „vonkajšie verejne prístupné priestranstvo, ktoré slúži všeobecnému využívaniu a ktoré je prístupné každému. Myslia sa tým najmä námestia, ulice, nábrežia, verejné parky, detské ihriská a voľné priestranstvá vytvorené kompaktnou zástavbou alebo rozvoľnenou zástavbou v zastavanom území“ [1].

Verejný priestor často vyjadruje viac než len jeho fyzickú podstatu, jeho chápanie sa čoraz viac posúva do roviny symbolickej, imaginárnej, do roviny virtuálnej reality, internetu, sociálnych sietí a médií. Verejný priestor v najširšom možnom slova zmysle nie je len priestorom hmotným, ale aj sociálnym priestorom, ktorý je neustále určený jeho užívaním a aktivitami, ktoré sa v ňom odohrávajú [2].

Môžeme ho označiť za médium, v ktorom sa odohrávajú všetky spoločenské deje a činnosti, ktoré sú nesúkromné a teda verejné. Nezáleží či médium je fyzické (hmotné) alebo mentálne, virtuálne (nehmotné). Pojem verejné priestranstvo môžeme chápať ako podmnožinu pojmu verejný priestor. Je jeho možným fyzickým stvárnením.

V mestách existujú rôzne typy verejných priestorov, vrátane ulíc a parkovísk, námestí, zelených plôch, budov a ich okolia atď. Zaberajú plochy rôznych veľkostí a plnia mnoho funkcií. Vo vysoko urbanizovaných oblastiach je nedostatok verejných priestorov a mnohé z dostupných priestorov sú prevládajúce s nepriepustnými povrchmi a chýbajú im prírodné prvky, čo zintenzívňuje výskyt negatívnych javov, napr. efekt tepelného ostrova v mestách [3].

[1] Tomáš Kadlec, Ing. Ing. arch; Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava

Nielen urbanizované priestory dlhodobo čelia týmto negatívnym javom. Existujú rôzne nástroje ako znížiť ich vplyvy prostredníctvom zásahov do verejného priestranstva.

Európska komisia **opatrenia založené na prírode** (NbS[2]) pre adaptáciu na zmenu klímy a znižovanie rizika katastrof definuje ako opatrenia, ktoré spolupracujú s prírodou a posilňujú ju s cieľom obnoviť a chrániť ekosystémy, a pomôcť spoločnosti prispôsobiť sa dôsledkom zmeny klímy a spomaliť ďalšie otepľovanie, a zároveň poskytnúť viacero ďalších výhod (environmentálnych, sociálnych a ekonomických). NbS sú „zastrešujúcim konceptom“ zahŕňajúcim ďalšie zavedené prístupy, napr. ekosystémový prístup a prístupy z neho vychádzajúce, udržateľné hospodárenie, ekosystémové hospodárenie, udržateľné lesné hospodárstvo, **zelenú infraštruktúru** (GI[3]) resp. **modro-zelenú infraštruktúru** (GBI[4]), adaptáciu založenú na ekosystémoch, opatrenia na prirodzené zadržiavanie vody a ekosystémové znižovanie rizika katastrof [4][5].

Riešenia GBI zohrávajú dôležitú úlohu pri formovaní prírodného kapitálu miest tým, že poskytujú početné výhody. Najdôležitejšie výhody sa týkajú zlepšenia **ekosystémových služieb**[6] súvisiacich s vodou vrátane pozitívneho vplyvu na reguláciu narušeného mestského hydrologického cyklu zachytávaním, zadržiavaním, infiltráciou a opätovným využitím dažďovej vody v povodiach, bližšie k zdroju odtoku, a zároveň znižujú riziko a účinky prívalových dažďov a povodní. Je tiež dôležité podporovať procesy čistenia dažďovej vody, najmä v tých riešeniach GBI, ktoré sa spoliehajú na účasť vegetácie, čím prispievajú k zlepšeniu kvality vody v mestských povodiach a znižujú náklady na odstraňovanie nečistôt [3].

Okrem spomenutých vlastností je možné pozorovať pozitívny vplyv tejto prírodnej siete na podporu biodiverzity, estetického výrazu sídel (predovšetkým verejných priestranstiev), kvality ovzdušia, ochrany pred slnkom a celkovej kvality života.

2. Európska legislatíva v kontexte implementácie GBI do európskeho prostredia

GBI definuje Európska komisia ako úspešne overený nástroj na poskytovanie ekologických, ekonomických a sociálnych výhod prostredníctvom prírodných riešení. Je to strategicky plánovaná sieť prírodných a polo prírodných oblastí s ďalšími environmentálnymi prvkami navrhnutými a spravovanými tak, aby poskytovali širokú škálu ekosystémových služieb [6].

Všeobecne sa predpokladá, že GBI môže prinášať spoločenské výhody a zároveň podporovať ochranu biodiverzity a ciele zmierňovania a adaptácie na zmenu klímy. Je uznávaná pre svoju multifunkčnosť a veľký potenciál efektívne sa zamerať na existujúce a nové mestské výzvy, ako sú klimatické zmeny alebo verejné zdravie [7].

Základy modro-zelených opatrení ako súčasť urbanistického návrhu verejných priestorov stanovuje európska legislatíva – *Green Deal*, v ktorej sú okrem iných medzi hlavnými cieľmi aj klimatická neutralita a zdravšie životné prostredie. Cieľom klimatickej neutrality je zníženie emisií skleníkových plynov, aby sa EÚ stala prvou klimaticky neutrálnou oblasťou na svete. Cieľom zdravšieho životného prostredia je plán na obnovu prírody a úsilie o nulové znečistenie s cieľom zabezpečiť zdravé životné prostredie pre budúce generácie [8].

Nariadenie o obnove prírody - *Nature Restoration Law* je prvým komplexným právnym predpisom svojho druhu platným pre celý kontinent. Je kľúčovým prvkom stratégie EÚ v oblasti biodiverzity, ktorá stanovuje záväzné ciele na obnovu degradovaných ekosystémov, najmä tých s najväčším potenciálom na zachytávanie a ukladanie uhlíka, a na prevenciu a znižovanie vplyvu

[2] NbS – z anglického: *nature-based solutions*
[3] GI – z anglického: *green infrastructure*
[4] GBI – z anglického: *green and blue infrastructure*
[5] Pojem GBI resp. GI môžeme chápať ako podmnožinu pojmu NbS
[6] Ekosystémové služby - *Millennium Ecosystem Assessment (MA)* ich definuje ako „prínosy, ktoré ľudia získavajú z ekosystémov. Patria sem produkčné služby, ako potraviny a voda; regulačné služby, ako regulácia povodní, sucha, degradácie pôdy a chorôb; podporné služby, ako tvorba pôdy a kolobeh živín; a kultúrne služby, ako rekreačné, spirituálne, náboženské a iné nemateriálne prínosy.“ [5]

prírodných katastrof. Jeden cieľov o urbánnych ekosystémoch hovorí o dosiahnutí žiadnej čistej straty zeleného mestského priestoru a stromového porastu do roku 2030 a stabilného nárastu ich celkovej plochy do roku 2030 [9].

3. Modro-zelená infraštruktúra ako súčasť návrhu mestského priestoru

V reakcii na výzvy, ktorým čelia mestá (rastúca urbanizácia, zhoršovanie životného prostredia, ekologická udržateľnosť) nadobúdajú na význame pojmy modro-zelená infraštruktúra (GBI) a opatrenia založené na prírode (NbS). NbS možno chápať ako akcie alebo intervencie, ktoré využívajú prírodné alebo napodobňujú prírodné procesy na riešenie mestských problémov, zatiaľ čo GBI začleňuje zelené a vodné prvky do mestského plánovania a dizajnu [10].

GBI možno rozdeliť na zelené a modré priestory v závislosti od typu prírodného prostredia. Okrem toho ju možno rozdeliť podľa mierky do troch odlišných úrovní: makromierka, mezomierka a mikromierka. Makromierka sa týka regionálnych a zeleno-modrých sietí a ekologických koridorov na úrovni povodia. Mezomierka zahŕňa mestské parky, lokálne zelené plochy a stredné zelené priestory, zatiaľ čo mikromierka zahŕňa zelené strechy, zelené fasády, malé záhrady a zelené nádvoria [11].

Voda a zeleň – tvoriace túto sieť sú úzko späté a na sebe závislé. V priestore sa takmer vždy vyskytujú vo fyzickom kontakte. Môžu mať rôzne formy - body, línie, plochy. Nachádzajú sa v krajine ako aj v urbanizovaných sídlach. Pre ich správne fungovanie je dôležité, aby boli navzájom prepojené, a tvorili čo možno najviac kontinuálnu sieť. Je pozitívom ak takáto sieť v určitej forme plynulo prechádza z krajiny do sídel. Ich lokalitu, trasovanie a usporiadanie predurčujú prírodné danosti - topografia, geológia, hydrológia, klíma, vegetácia, človek.

Tabuľka 1: Hlavné zložky modro-zelenej infraštruktúry.

Zložky		Prvky
Zelené plochy	*Green areas*	lesy, lesoparky, parky, trvalé trávnaté porasty, vinice, sady, záhradkárske oblasti, cintoríny, remízky, zelené strechy, zelené fasády
Zelené línie	*Green lines*	biokoridory, pásy zelene, aleje, vetrolamy, medze
Modré plochy	*Blue areas*	jazerá, močariská, vodné nádrže, retenčné a akumulačné prvky, sieť podzemnej vody
Modré línie	*Blue lines*	rieky, potoky, mŕtve ramená, kanále, retenčné a akumulačné prvky

Príklady opatrení (riešenia, zásahy, dizajn) založené na tvorbe GBI v urbánnom prostredí:

Tvorba a udržiavanie zelených prvkov (Creation and maintenance of green elements) – ich hlavnou funkciou je ochladzovanie, mikroklíma, zdravšie ovzdušie, retencia, biodiverzita, estetika, rekreácia.

Tvorba a udržiavanie modrých prvkov (Creation and maintenance of blue elements) – ich hlavnou funkciou je ochladzovanie, mikroklíma, podpora zelene, retencia, biodiverzita, estetika, rekreácia.

Priepustné povrchy (Permeable surfaces) – ako napríklad dlažby, štrkové povrchy, zatrávňovače sú schopné zadržať väčšie množstvo zrážkovej vody v území ako nepriepustné povrchy (asfalt, betón). Absorpciou vody do podložia priamo na mieste znižujú riziko vzniku povodní.

Retenčné priekopy (Bioswales) sú ekologické prvky pozostávajúce z drenážnej priekopy vyplnenej vegetáciou, kompostom a/alebo kamenným zásypom, navrhnuté ako prirodzené filtračné systémy na odstraňovanie znečistenia odtekajúcou vodou, čím sa zlepšuje kvalita vody v mestských oblastiach [10].

Dažďové záhrady (Rain gardens) sú upravené priehlbiny, ktoré zachytávajú a absorbujú dažďovú vodu, znižujú odtok dažďovej vody, zabraňujú znečisteniu vody, dopĺňajú podzemnú vodu a vytvárajú biotopy pre vodomilné rastliny a hmyz. Zároveň zvýrazňujú estetické vlastnosti [10].

Retenčné nádrže (Retention basin) sú stavby určené na zhromažďovanie a dočasné uskladnenie prebytočnej dažďovej vody. Môže ísť o prirodzenú a/alebo umelú drenážnu infraštruktúru. Pomáhajú regulovať tok vody, zmierňovať riziká záplav a zlepšovať kvalitu vody filtrovaním znečisťujúcich látok pred ich vypustením do prírodných vodných útvarov [10].

Zelené strechy (Green roofs) a ich živá vegetácia inštalovaná na strechách budov, ktorá poskytuje viacero výhod, ako napríklad zadržiavanie dažďovej vody, izoláciu, zlepšenie kvality ovzdušia, zníženie efektu tepelného ostrova v mestách a vytváranie biotopov [10].

Zelené fasády (Green facades) a vertikálne inštalácie rastlín na vonkajšie alebo vnútorné steny budov, ktoré prispievajú k zlepšeniu kvality ovzdušia, tepelnej regulácie, zníženiu hluku a estetickej hodnote [10].

Implementácia riešení GBI sa navrhuje s cieľom minimalizovať negatívne environmentálne javy v mestách. Existuje však množstvo technických a biofyzikálnych obmedzení [3]:

Priestorové a funkčné aspekty

Fyzický rozmer priestoru v meste je určený jeho morfológiou, t. j. usporiadaním základných prvkov mestskej štruktúry, a fyzickými vlastnosťami a komponentmi miesta vrátane sklonu terénu alebo typu terénu. Medzi bariéry v tejto skupine patria potenciálne negatívne vzájomné závislosti[7], ktoré sa kaskádovito prejavujú mestským systémom za povodňových aj nepovodňových podmienok. Fyzické prvky, ktoré sa zvyčajne používajú na ochranu pred povodňami (priehrady, hrádze a infraštruktúra slúžiaca na uskladnenie a prepravu vody), bohužiaľ majú tendenciu obmedzovať prístupnosť cenného priestoru na oddych a rekreáciu, zelene a brániť zlepšeniu biodiverzity atď.

GBI zahŕňajú aj obmedzenia, ako je potreba získania finančných prostriedkov a náročnosť implementácie zložitých technológií monitorovania, ako aj náročnosť údržby rozsiahlych systémov GBI po ich implementácii [3].

Environmentálne aspekty

V širšom kontexte pozitívneho vplyvu GBI sa komplexné systémy GBI stávajú veľmi účinným nástrojom na vytváranie, obnovu a ochranu vodných a suchozemských biotopov. Treba však mať na pamäti, že vplyv GBI na biodiverzitu sa môže líšiť a jeho skutočný rozsah závisí od individuálnych charakteristík daného GBI, najmä v jeho lokálnej integrácii s hydrologickými mestskými podmienkami a širšími ekologickými aktivitami. Negatívne dôsledky GBI pre biodiverzitu súvisia aj s vytváraním podmienok pre nekontrolované šírenie inváznych druhov.

Kľúčom k zlepšeniu životných podmienok v mestách je zlepšenie kvality ovzdušia vrátane zabezpečenia vody pre rast rastlín a následné využitie ich čistiacich schopností a kapacít na produkciu kyslíka [3].

Sociálne aspekty

Mnohé prvky prispievajú k širšiemu sociálnemu kontextu funkcií a vnímania verejných priestorov. Jeho príspevok k zlepšeniu klimatických podmienok sa priamo premieta do zlepšenia životných podmienok v meste, zdravia jeho obyvateľov, ako aj do zabezpečenia blahobytu jednotlivcov. Riešenia verejných priestorov zohrávajú úlohu pri organizácii rekreačných priestorov, poskytujú obyvateľom mesta kontakt s prírodou a s aktivitami v prírode. Integrácia ľudí s prírodným

[7] každý prvok v mestskom prostredí ovplyvňuje a je ovplyvňovaný ostatnými prvkami, a tieto prepojenia sa môžu kumulovať alebo šíriť naprieč systémom

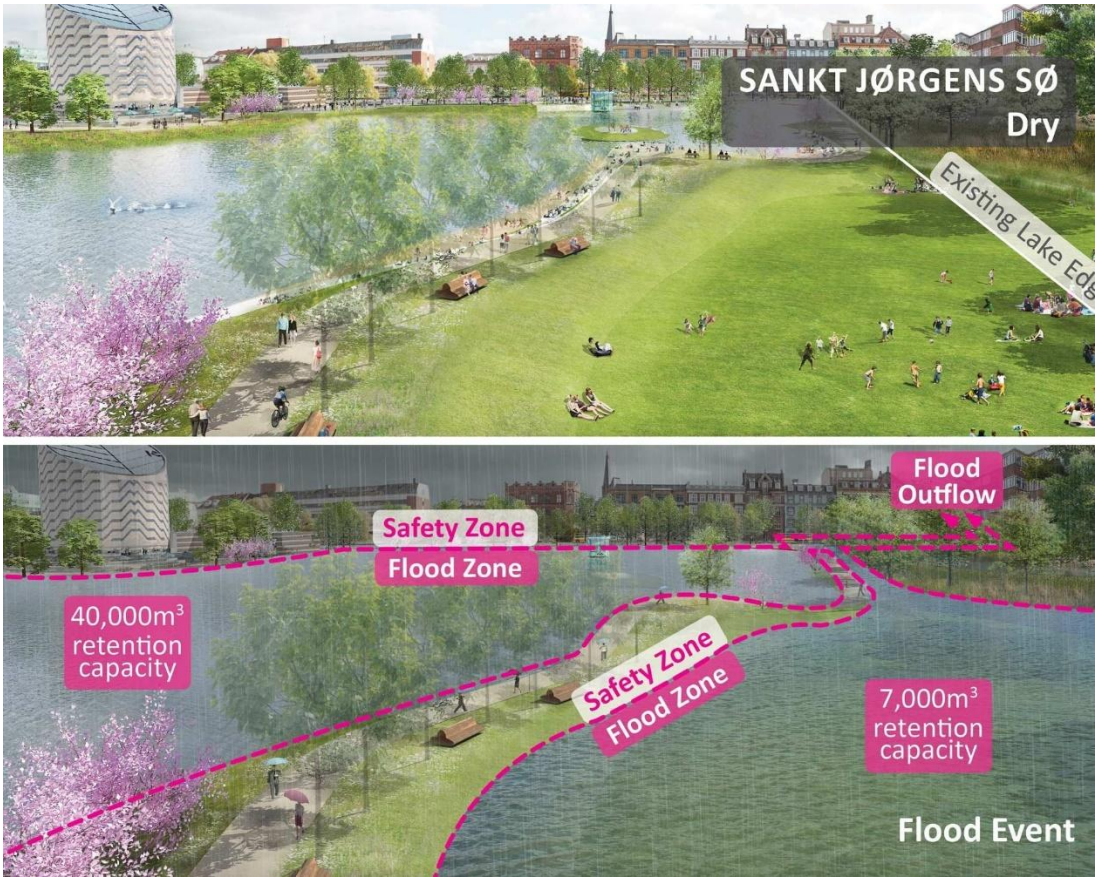
prostredím prebieha kombináciou vody a zelene v mestských verejných priestoroch, ktoré sa vďaka tomu stávajú atraktívnejšími.

Pre dosiahnutie úspechu je kľúčový interdisciplinárny prístup k adaptívnemu plánovaniu a dizajnu, ktorý nevyhnutne zahŕňa všetky potenciálne zainteresované strany do tohto procesu, aby prijaté opatrenia boli spoločensky pochopené a považované za prijateľné. Pre úspech iniciatív tvorby GBI je dôležité zapojiť taktiež miestnu komunitu do procesu plánovania a riadenia [3].

GBI môže tiež vytvárať priestor pre docielenie sociálnej inklúzie, ktorá je definovaná ako proces zlepšovania podmienok pre účasť obyvateľov v spoločnosti u znevýhodnených skupín, a to prostredníctvom rozširovania ich príležitostí a prístupu k zdrojom [12].

Konkrétny príklad implementácie modro-zelených opatrení do návrhu mestského priestoru:
Cloudburst Management Plan, Kodaň, Dánsko.

Je mestská stratégia mesta Kodaň na riešenie extrémnych zrážok. Stratégiu prijalo mesto v roku 2012 ako doplnok ku Kodaňskému plánu adaptácie na zmenu klímy prijatému o rok skôr. Cieľom plánu je znížiť dopad povodní v dôsledku silných dažďov, ktorých frekvencia sa očakáva v dôsledku klimatických zmien. Na implementáciu plánu si mesto kladie za cieľ realizovať 300 projektov v priebehu 20 rokov. Mesto každý rok rozhoduje o tom, ktoré projekty sa budú realizovať, prostredníctvom procesu stanovovania priorít, ktorý zabezpečuje, že nové projekty sa budú realizovať vo vysoko rizikových oblastiach, v oblastiach, kde sa opatrenia ľahko implementujú, alebo v oblastiach, kde je možné nové investície prepojiť s prebiehajúcimi projektmi rozvoja miest. Plán spoločne implementuje a financuje mesto Kodaň, spoločnosť Greater Copenhagen Utility Company a súkromní aktéri, ako sú napríklad súkromní vlastníci pôdy [13].



Obrázok 1: Príklad vodozádržného opatrenia v rámci stratégie mesta Kodaň - Cloudburst Management Plan *(Zdroj: Interlace Hub. Cloudburst Management Plan – Copenhagen. Dostupné online: https://interlace-hub.com/cloudburst-management-plan-copenhagen)*

4. Dopady na kvalitu prostredia a život mesta

Dopady implementácie modro-zelených opatrení na kvalitu mestského prostredia sú nasledovné:

Zadržiavanie vody – prevencia záplav a sucha

Začlenením prirodzených oblastí zadržiavania vody môže GBI pomôcť pri riadení dažďovej vody a znižovaní rizika záplav [14]. Takéto prvky majú zároveň schopnosť udržiavať vodu v prostredí.

Zlepšenie biodiverzity

Tieto prírodné oblasti vytvárajú dôležité biotopy pre rôzne druhy, čím podporujú biodiverzitu v mestskom a vidieckom prostredí. Aj malé plochy vegetácie, ako sú zelené strechy, môžu poskytnúť biotop pre rôzne druhy hmyzu a vtákov. Prvky GBI môžu často fungovať ako ekokoridory, ktoré sú kľúčové pre zabezpečenie defragmentácie krajiny a ekosystémov a prirodzených priechodov pre rôzne druhy [14].

Zlepšenie kvality ovzdušia

Vegetácia filtruje znečisťujúce látky zo vzduchu, čo vedie k lepšej kvalite ovzdušia pre komunity a má priamy pozitívny vplyv na zdravie dýchacích ciest [14].

Odolnosť voči zmene klímy

GBI môže pomôcť mestám prispôsobiť sa dopadom zmeny klímy, ako sú zvýšené zrážky a rastúce teploty. Zelené a modré oblasti výrazne znižujú teplotu vzduchu počas teplejších mesiacov. GBI môže zmierniť riziko povodní spomalením a znížením prietoku dažďovej vody [14].

Rekreačné priestory

Parky, zelené strechy a vodné plochy poskytujú priestory na rekreáciu a relaxáciu, čím sa zlepšuje kvalita života obyvateľov [14].

Estetická hodnota

Začlenenie prírody do mestského dizajnu zvyšuje vizuálnu príťažlivosť oblastí, čím sa stávajú atraktívnejšími pre obyvateľov a návštevníkov [14].

Ekonomické výhody

Táto infraštruktúra môže zvýšiť hodnotu nehnuteľností a prilákať cestovný ruch, čím prispieva k miestnym ekonomikám [14].

5. Záver

Modro-zelená infraštruktúra (GBI) slúži ako dôležitý a inovatívny prístup k riešeniu environmentálnych problémov a klimatických zmien, čím sa zvyšuje kvalita mestského prostredia. Táto infraštruktúra má rozsiahly vplyv na aspekty, ako je hospodárenie s vodou, regulácia teploty, biodiverzita a kvalita ovzdušia, ktoré spoločne posilňujú odolnosť prostredia [11].

Modro-zelené opatrenia nie sú doplnkom, ale integrálnou súčasťou urbanistického návrhu. Ich opodstatnenosť vie tak chrániť naše prostredie, ako aj nás – jeho užívateľov. Okrem udržateľných opatrení, súvisiacimi s odolnosťou verejného priestoru voči negatívnym vplyvom klimatických zmien, dokážu ponúknuť aj estetické, sociálne a atraktívne urbánne prostredie.

V rámci pojednávanej témy je asi najvýznamnejšou výzvou nastavenie a zrealizovanie stratégie implementácie modro-zelených opatrení do návrhu miesta. Je veľa príkladov – inšpiratívnych príkladov v predovšetkým európskych mestách, kde návrh modro-zelenej infraštruktúry chráni verejný priestor a ľudí. Dôležitým aspektom, ktorý určuje úspešnosť takejto implementácie, je okrem dobrého návrhu aj pragmatická spolupráca všetkých aktérov a nastavenie spoločnej vízie a jednotlivých cieľov.

Literatúra

[1] Zákon č. 200/2022 Z. z. Zákon o územnom plánovaní.

[2] ŠINDLEROVÁ, Veronika. *Systém veřejných prostorů.* 2013. Dizertačná práca. Praha: Fakulta architektury ČVUT.

[3] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY; European Commission. *Nature-based solutions in Europe: policy, knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction.* [online]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. ISBN 978-92-9480-362-7. DOI 10.2800/919315. [cit. 2025-10-25]. Dostupné na: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/da65d478-a24d-11eb-b85c-01aa75ed71a1/language-en

[4] KIMIC, Kinga, OSTRYSZ, Karina. *Assessment of Blue and Green Infrastructure Solutions in Shaping Urban Public Spaces—Spatial and Functional, Environmental, and Social Aspects.* Sustainability, 2021, roč. 13, č. 19, čl. 11041. [online]. Dostupné na: https://doi.org/10.3390/su131911041

[5] MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. *Ecosystems and human well-being: Wetlands and water – Synthesis.* Washington, DC: World Resources Institute, 2005. ISBN 1-56973-597-2. [online]. Dostupné na: https://biblioteca.cehum.org/bitstream/123456789/143/1/Millennium%20Ecosystem%20Assessment.%20ECOSYSTEMS%20AND%20HUMAN%20WELL-BEING%20WETLANDS%20AND%20WATER%20Synthesi.pdf

[6] EURÓPSKA KOMISIA. *Green Infrastructure (GI) — Enhancing Europe's Natural Capital* [online]. Brusel: Európska komisia, 2023 [cit. 2025-10-25]. Dostupné na: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:d41348f2-01d5-4abe-b817-4c73e6f1b2df.0014.03/DOC_1&format=PDF

[7] ANDERSSON, E. et al. Based on nature, enabled by social-ecological-technological context: deriving benefit from urban green and blue infrastructure. *Ecology & Society,* 2022, roč. 27, č. 4, čl. 18. [online]. Dostupné na: https://ecologyandsociety.org/vol27/iss4/art18/

[8] RADA EURÓPSKEJ ÚNIE. *Európska zelená dohoda.* [online]. [cit. 2025-10-25]. Dostupné na: https://www.consilium.europa.eu/sk/policies/european-green-deal/#goals

[9] EUROPEAN COMMISSION. *Nature Restoration Regulation. Supporting the restoration of ecosystems for people, the climate and the planet.* [online]. Brussels: European Commission, 2024, [cit. 2025-10-25]. Dostupné na: https://environment.ec.europa.eu/topics/nature-and-biodiversity/nature-restoration-regulation_en

[10] PINTO, Luís Valença, Miguel Inácio, Paulo Pereira. Green and blue infrastructure (GBI) and urban nature-based solutions (NbS) contribution to human and ecological well-being and health. *Oxford Open Infrastructure and Health,* 2023, roč. 1, čl. ouad004 [online]. Dostupné na: https://doi.org/10.1093/ooih/ouad004

[11] KHODABANDEH, A. at al. *Analysis of Green-Blue Infrastructure Effects on Climate Change: A Systematic Review.* [online]. [cit. 2025-10-26]. Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/389642291_Analysis_of_Green-Blue_Infrastructure_Effects_on_Climate_Change_A_Systematic_Review

[12] DE HAAS, Wim; HASSINK, Jan; STUIVER, Marian. The role of urban green space in promoting inclusion: experiences from the Netherlands. *Frontiers in Environmental Science,* 2021, vol. 9, article 618198. [online]. Dostupné na: https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.618198

[13] MESTO KODAŇ. *Cloudburst Management Plan – Copenhagen.* [online]. Kodaň: Mesto Kodaň, 2012 [cit. 2025-10-26]. Dostupné na: https://interlace-hub.com/cloudburst-management-plan-copenhagen

[14] SEVERIN, Astrid; MICHALIKOVÁ, Magda. *Policy brief on green and blue infrastructure.* [online]. Lille: Interreg Europe Policy Learning Platform, september 2024 [cit. 2025-10-26]. Dostupné na: https://www.interregeurope.eu/sites/default/files/2024-09/Policy%20brief%20on%20Green%20and%20blue%20infrastructure.pdf

OpenAI (2025), ChatGPT, preklad textu abstraktu, kontrola gramatiky a reformulácie textu.

Anežka Kašiarová[1]
Študijný program: D-TKPS4, 3. ročník

HYPOTETICKÁ REKONŠTRUKCIA KOSTOLA NANEBOVZATIA PANNY MÁRIE V BANSKEJ ŠTIAVNICI

HYPOTHETICAL RECONSTRUCTION OF THE CHURCH OF THE ASSUMPTION OF THE VIRGIN MARY IN BANSKÁ ŠTIAVNICA

Abstract
The paper presents the results of the architectural and historical analysis of the Parish Church of the Assumption of the Virgin Mary in Banská Štiavnica, which underwent several significant transformations from the Romanesque period to the present. Based on the research, six or seven developmental phases were identified, reflecting changes in the spatial and liturgical characteristics of the building. The aim of the work is a hypothetical reconstruction of the individual phases of the church's development, with an emphasis on the liturgical arrangement and its transformations after the Second Vatican Council. The reconstruction is based on a combination of archival, architectural-historical, and comparative analyses, which help to supplement missing information about the original form of the building. The results provide a basis for the interpretation of historical sacred spaces within a broader cultural and historical context.

Kľúčové slová / Key Words
kostol; hypotetická rekonštrukcia; Banská Štiavnica

1. Analýza objektu

Rímskokatolícky farský kostol Nanebovzatia Panny Márie v Banskej Štiavnici (pôvodne kostol sv. Mikuláša) sa nachádza na východnom okraji historického jadra osídlenia z prelomu 12. – 13. storočia. Kostol predstavuje významný príklad viacstupňového vývoja sakrálneho priestoru so zásadnými liturgickými, technickými a estetickými zásahmi. Jeho priestorové transformácie ilustrujú viaceré princípy, ktoré ho predurčujú na reprezentatívne zastúpenie väčšiny rímskokatolíckych kostolov nachádzajúcich sa v dekanáte Banská Štiavnica.

Pre správne a komplexné pochopenie tohto objektu a jeho vývoja je nevyhnutné vypracovať podrobnú architektonicko-historickú analýzu. Analýza sa zameriava najmä na identifikáciu vývojových fáz objektu so zreteľom na zásahy, ktoré zásadne ovplyvnili liturgický priestor a jeho funkčné využitie. Pozornosť je venovaná aj úpravám súvisiacim s implementáciou liturgickej reformy a ich vplyvu na dispozíciu a mobiliár. Iba na základe takéhoto prístupu je možné objekt adekvátne interpretovať v jeho historickom i súčasnom liturgickom kontexte a pristúpiť k hypotetickej rekonštrukcii jednotlivých vývojových fáz.

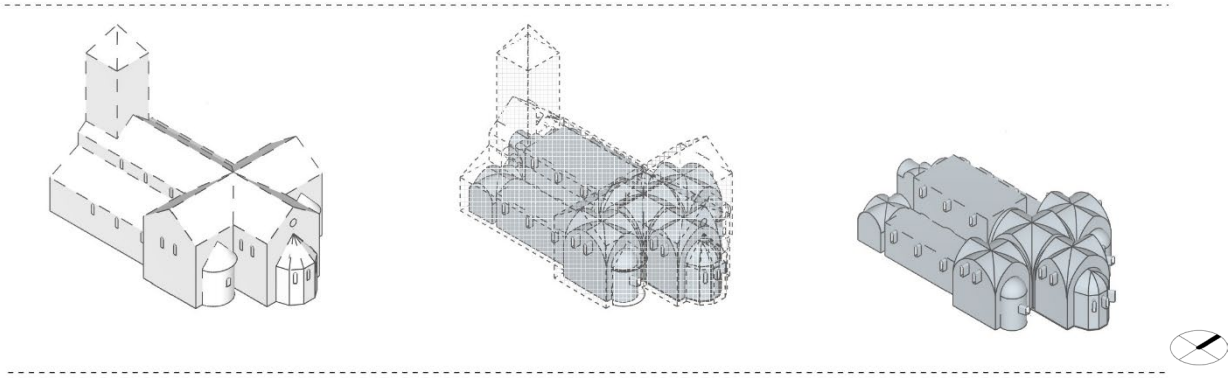
[1] Anežka Kašiarová, Ing., Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava

1.1 Architektonicko-historický vývoj kostola

Architektonicko – historický vývoj kostola Nanebovzatia Panny Márie je mimoriadne komplexný. Na základe dochovaných písomných prameňov a výsledkov posledných výskumov [1] je možné rozlíšiť šesť až sedem vývojových etáp.

1.1.1 1. Etapa – románska (do roku 1500)

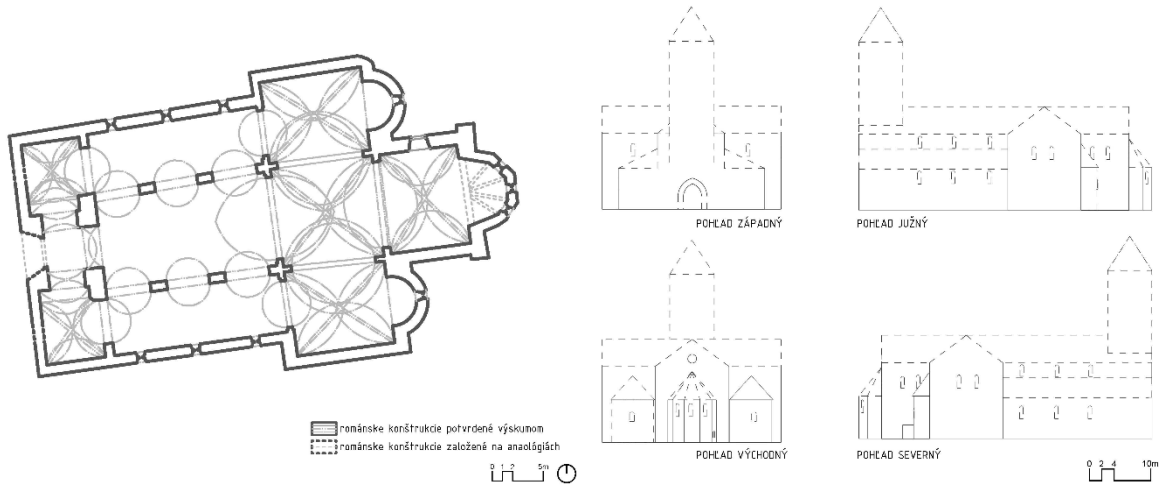
V neskororománskom období bol kostol trojloďový s bazilikálnymi prvkami. Skupina historikov umenia [2] poukazuje na podobnosť s kostolom benediktínskeho kláštora v meste Hirsau (Nemecko) a kostolom sv. Juraja v meste Ják (Maďarsko), ktoré v tejto práci slúžili ako analógia pri hypotetickej rekonštrukcii románskej podoby kostola Nanebovzatia Panny Márie.



Obr. 1 : Axonometria hypotetickej rekonštrukcie kostola - románska etapa (exteriér)

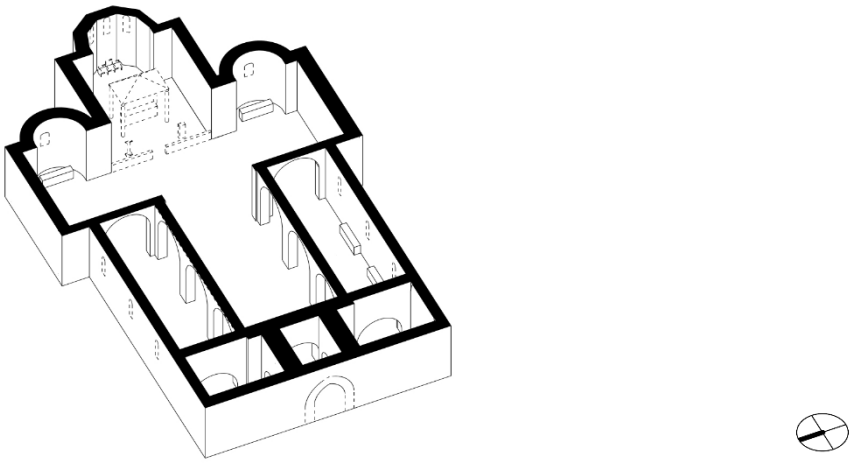
Pôdorys svätyne (resp. chóru) bol pravouhlý, zakončený polygonálnym presbytériom. Smerom k priečnej lodi – transeptu - sa otváral víťazným oblúkom, ktorý sa pravdepodobne zachoval dodnes. Na východnej strane transeptu sa nachádzali dve polkruhové apsidy, zaklenuté pôvodnou konchou s profilovanou rímsou. Západnú časť kostola tvorila empora prechádzajúca cez celú šírku trojlodia -jej stredná časť bola pravdepodobne vyššie položená než bočné. [1]

Podľa [3, 4] mal kostol v hlavnej i bočných lodiach pravdepodobne drevený trámový strop. Výskum [1] túto skutočnosť síce priamo nepotvrdzuje vzhľadom na rozsah deštrukcie, dochovala sa však krížová klenba v priestore transeptu svätyne, resp. chóru.



Obr. 2 : Pôdorys a pohľady hypotetickej rekonštrukcie kostola - románska etapa

V tomto období patril kostol dominikánom, čo umožňuje predpokladať prítomnosť prvkov zdôrazňujúcich miesto ohlasovania reči – kazateľnice alebo ambóny. V historických sakrálnych stavbách sa často nachádzali dve ambóny [5] : severná, monumentálnejšia, určená na prednes evanjelia, a južná, skromnejšia, vyhradená pre čítania.



Obr. 3 : Axonometria hypotetickej rekonštrukcie kostola - románska etapa (interiér)

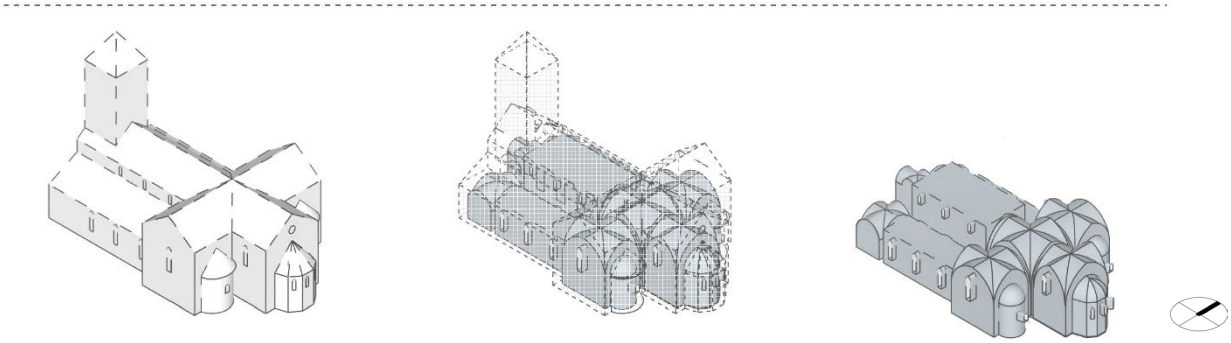
V objekte sa však s istotou nachádzal kamenný oltár [1] a nad ním, sa podľa [6] mohlo nachádzať cibórium[2], ktoré zdôrazňovalo jeho výnimočnosť a osobitné miesto úcty.

Priestor chóru a zvyšku lode zvykol byť výraznejšie oddelený jednoduchou chórovou prepážkou (zábradlím pred oltárom) [7]. Uzáver presbytéria pravdepodobne dotváralo miesto na sedenie pre celebranta a posluhujúcich, odkiaľ mohol celebrant prednášať homíliu. [5] Neskôr, počas raného stredoveku, toto miesto strácalo význam, keďže kňaz sa počas slávenia nachádzal primárne pri oltári.

Podlahu tvorila kamenná alebo tehlová dlažba; v prípade tehál však ide skôr o predpoklad. Steny boli z povrchovo neupravovaného kamenného muriva [1]. Presnú pozíciu a veľkosť okien možno stanoviť len na základe analógií, keďže rozsah deštrukcie to neumožňuje. Okná boli pravdepodobne úzke štrbinové, široké približne 40-50 cm, osadené vo výške nad 4 metre od podlahy.

1.1.2 2. Etapa – stredoveké (gotické) prestavby (okolo roku 1500)

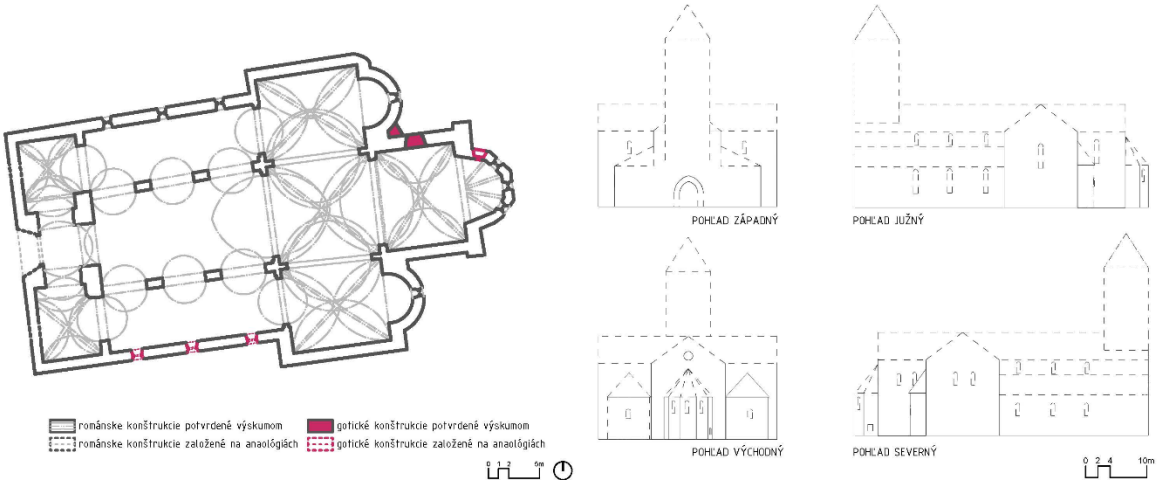
Bazilikálne usporiadanie kostola zostalo zachované, a na kostole neboli uskutočnené výraznejšie prestavby, len na južnej strane bočnej lode a svätyne boli vybúrané veľké gotické okná [1], ktoré mohli byť dvojnásobne väčšie oproti pôvodným románskym.



Obr. 4 : Axonometria hypotetickej rekonštrukcie kostola - stredoveké prestavby (exteriér)

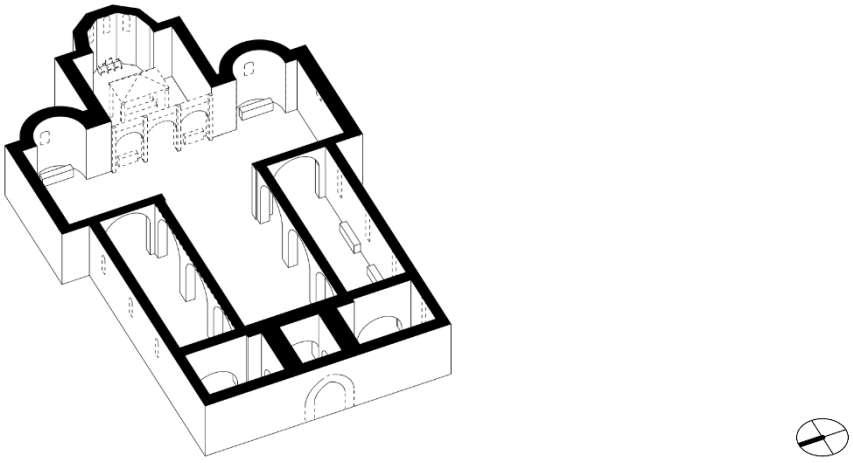
[2] baldachýnová strieška so závesmi

Okolo roku 1500 bol kostol súčasťou dominikánskeho kláštora, čo potvrdzuje aj gotický portál v severnej časti svätyne. [1]



Obr. 5 : Pôdorys a pohľady hypotetickej rekonštrukcie kostola – stredoveké prestavby

Od 12. storočia kostoloch začali budovať letnery[3], ktoré sa vyvinuli z jednoduchej chórovej priečky a tribúny. Letnery priestorovo i symbolicky oddeľovali sanktuárium od priestoru veriacich a často obsahovali vyvýšené pódium [7]. Pred letnerom sa nachádzal laický oltár určený pre bohoslužbu ľudu, zatiaľ čo za ním prebiehala oficiálna bohoslužba kléru. Na Slovensku sa nezachoval žiadny letner, no výskumy [7] dokladajú ich prítomnosť aj vo farských kostoloch akým bol tento – preto hypotetická rekonštrukcia predpokladá jeho možnú prítomnosť v kostole.

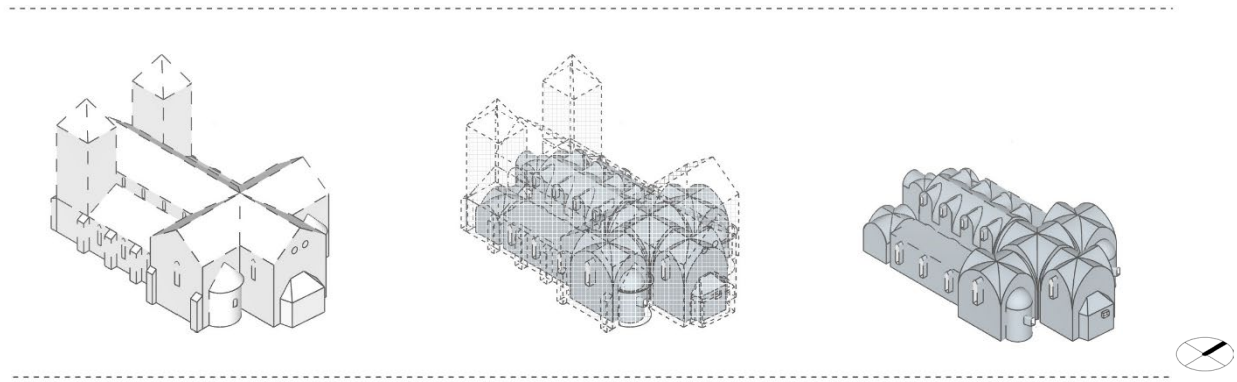


Obr. 6 : Axonometria hypotetickej rekonštrukcie kostola - stredoveké prestavby (interiér)

[3] vysoké, bohato zdobené chórové prepážky

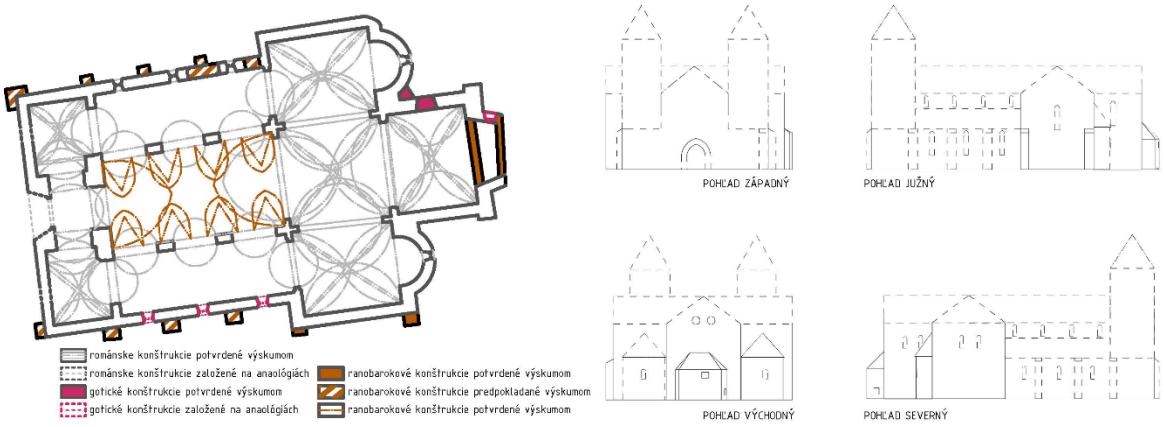
1.1.3 3. Etapa – baroková (koniec 17. storočia)

V druhej polovici 17. storočia boli opravené podlahy a osadené nové okná. Po požiari v roku 1679 bola nadstavaná a na novo zaklenutá hlavná loď. Zachované omietky v podkroví naznačujú, že kostol bol zaklenutý valenou klenbou s lunetami, riešenými odlišne než v súčasnosti. [1]



Obr. 7 : Axonometria hypotetickej rekonštrukcie kostola - ranobarokové prestavby (exteriér)

Východná časť pôvodnej svätyne bola zbúraná a nahradená prístavbou, ktorá v tom čase pravdepodobne slúžila ako sakristia, čím sa celé presbytérium skrátilo do súčasnej podoby. [1]

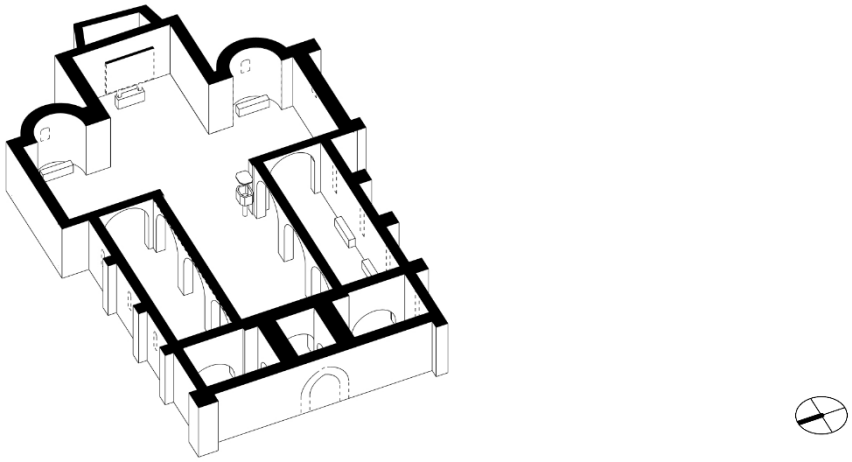


Obr. 8 : Pôdorys hypotetickej rekonštrukcie kostola – ranobarokové prestavby

V tomto období boli oltáre umiestňované v zadnej časti svätyne a nad nimi sa objavovali monumentálne retabuly[4]. Tie boli budované na podstavcoch a tvorili dominantu svätyne. [8] Do kostola boli prinesené aj dva nové bočné oltáre. [1]

Tridentský koncil (1545-1563) ovplyvnil architektúru sakrálnych priestorov a s cieľom zlepšiť viditeľnosť oltára sa odstraňovali letnery [9], čím vznikala potreba nového miesta pre ohlasovanie Božieho slova. To viedlo k rozšíreniu umiestňovania kazateľníc.

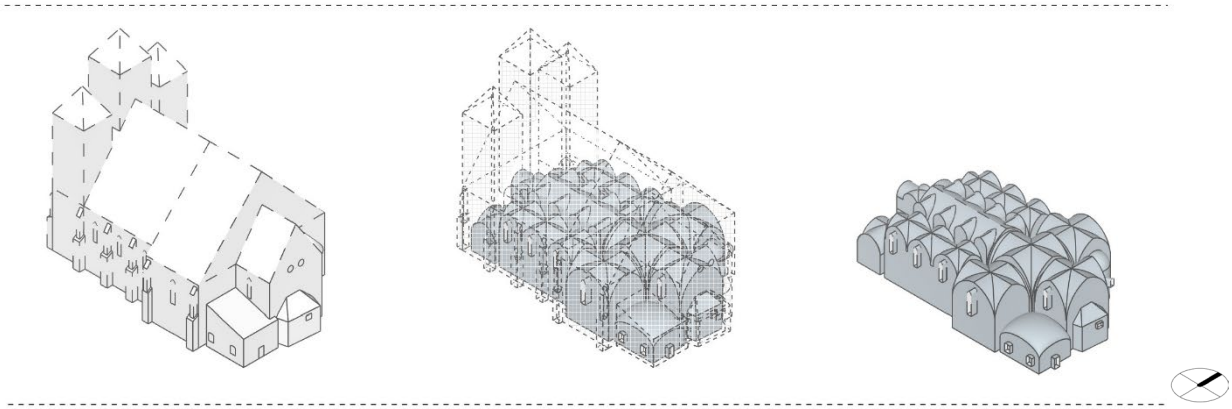
[4] drevený, kovový alebo kamenný nadstavec v podobe skrinky



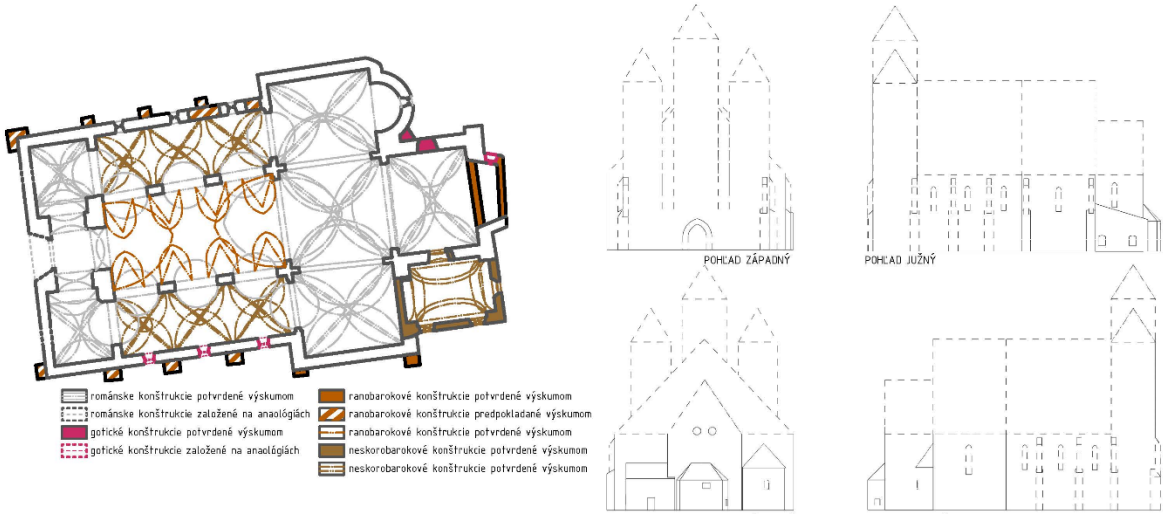
Obr. 9 : Axonometria hypotetickej rekonštrukcie kostola - ranobarokové prestavby (interiér)

1.1.4 4. Etapa – neskorobarokové prestavby (1. polovica 18. storočia)

V prvej polovici 18. storočia bola vybudovaná nová sakristia na južnej strane, čím zanikla pôvodná polkruhová apsida.



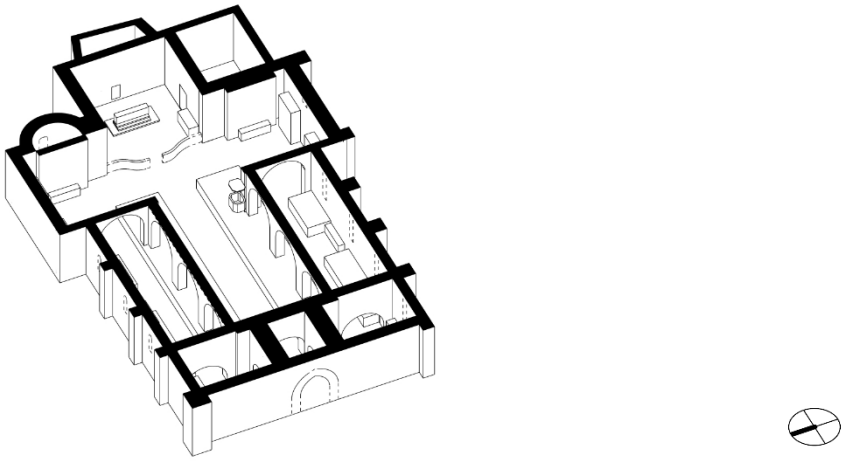
Obr. 11 : Axonometria hypotetickej rekonštrukcie kostola - neskorobarokové prestavby (exteriér)



Obr. 10 : Pôdorys a pohľady hypotetickej rekonštrukcie kostola – neskorobarokové prestavby

Bočné lode boli výrazne zvýšené, čím zaniklo pôvodne bazilikálne usporiadanie a trojlodie získalo spoločnú sedlovú strechu. [1]

Na začiatku 18. storočia sa v objekte nachádzali tri oltáre – jeden hlavný a dva bočné [1]. Baroková dekoratívnosť priniesla bohaté zdobenie stĺpov volútami, vencovými rímsami a sochami anjelov či svätcov. Predná stena oltárov bývala často zdobená vzácnymi textíliami alebo závesmi.

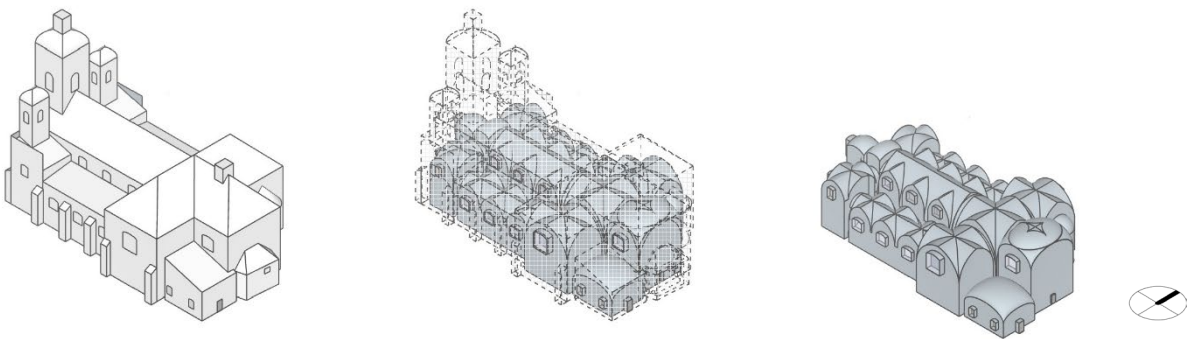


Obr. 12 : Axonometria hypotetickej rekonštrukcie kostola - neskorobarokové prestavby (interiér)

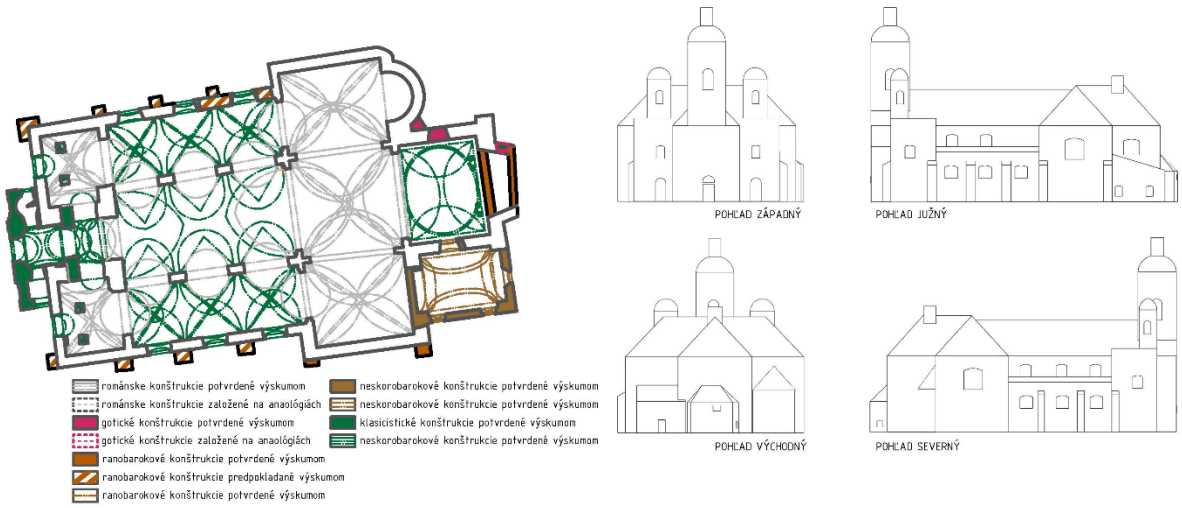
Po požiari pribudla v objekte kazateľnica, organ a ďalšie štyri bočné oltáre, medzi loďou a svätyňou bolo vybudované zábradlie. Interiér dopĺňali červené koberce [1].
Tridentský koncil zároveň priniesol do kostolov lavice [5], ktoré umožnili veriacim sedieť počas liturgie a ovplyvnili organizáciu interiéru, kde centrálnym liturgickým bodom zostal hlavný oltár.

1.1.5 5. Etapa – klasicistické prestavby (19. storočie)

V roku 1806 postihol kostol ďalší požiar. Neskorobaroková podoba objektu tak trvala menej než päťdesiat rokov. Piata etapa priniesla výrazné zmeny v hmote i výraze stavby. Objektu bolo prinavrátené bazilikálne usporiadanie v podobe trojlodia Tieto zmeny je možné v zásade pozorovať na objekte dodnes, keďže boli poslednými výraznými prestavbami [1].

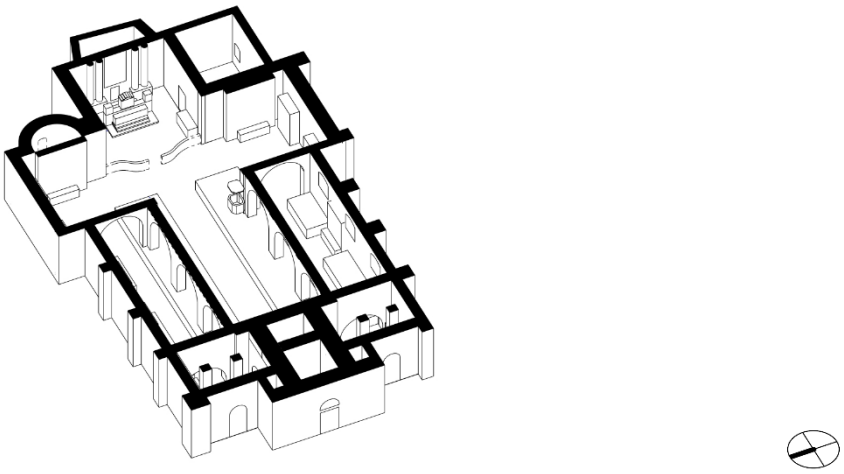


Obr. 13 : Axonometria hypotetickej rekonštrukcie kostola - klasicistické prestavby (exteriér)



Obr. 14 : Pôdorys a pohľady rekonštrukcie kostola – klasicistické prestavby

Stredná loď bola novo zaklenutá a jej klenba bola znížená, bočné lode boli získali taktiež nové nižšie položené klenby. V svätyni bola vybudovaná kupola. Gotické a barokové okná nahradili široké okná so segmentovým zakončením. Obnovené boli aj klenby pod strednou emporou. [1]



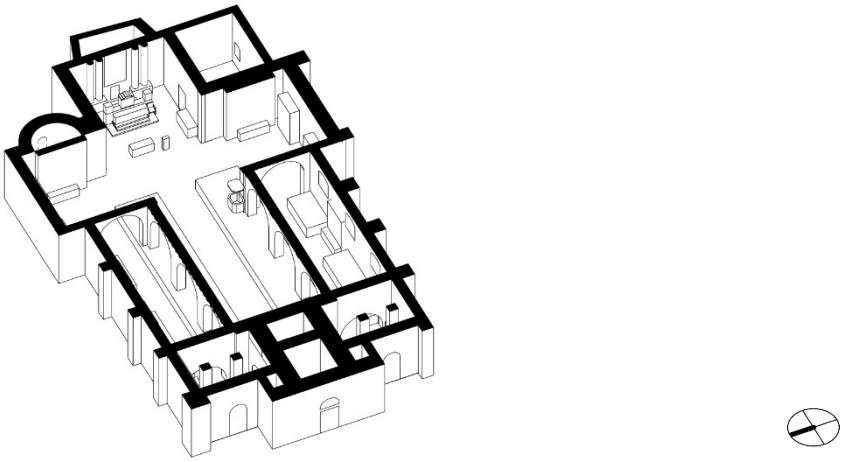
Obr. 15 : Axonometria rekonštrukcie kostola – klasicistické prestavby (interiér)

1.1.6 6. Etapa –úpravy kostola v 20. storočí

Na začiatku 20. storočia boli osadené vitrážové okná lokálne opravené omietky, poškodené vlhkosťou. V interiéri bola položená aj nová keramická dlažba. [1]

1.1.7 Súčasnosť – úpravy po druhom vatikánskom koncile

Pred liturgickou reformou Druhého vatikánskeho koncilu sa liturgia slávila *ad orientem* - tvárou k oltáru a chrbtom k ľudu. Liturgická reforma umožnila slávenia *versus populum* - tvárou k veriacim, čím sa oltár symbolicky aj funkčne vrátil do stredu svätyne. Pevné historické oltáre zostali zachované, často ako priestor pre bohostánok, pričom pribudli nové oltáre určené pre aktuálne liturgické slávenie. [8]



Obr. 16 : Axonometria súčasného stavu kostola (interiér)

Koncil zároveň obnovil aj význam ambóny, ktorá sa vrátila do blízkosti oltára. [10] Súčasťou liturgického priestoru býva aj rečnícky pult, spravidla umiestnený na opačnej strane od ambóny. [5] Miesto na sedenie pre celebranta nadobudlo nový význam – umiestňuje sa v závere presbytéria, oproti ambóne, pričom po stranách sa ešte môžu nachádzať stoličky pre miništrantov. Z tohto miesta kňaz, vedie úvodné a záverečné časti liturgie, homíliu a príhovory.

Za novodobé zásahy možno považovať novú presklenú podlahu v prednej časti lode a nové liturgické zariadenie z roku 2018 - presklený oltár a ambón - ktoré nahradili pôvodné drevené.

2. *Porovnanie jednotlivých etáp*

Obr. 17 : Porovnanie jednotlivých vývojových etáp

Záver

Hypotetická rekonštrukcia kostola Nanebovzatia Panny Márie v Banskej Štiavnici predstavuje pokus o systematické zobrazenie vývoja liturgického priestoru tohto významného sakrálneho objektu. Na základe kombinácie architektonicko-historického výskumu, analógií a interpretácie liturgických princípov bolo možné identifikovať hlavné zmeny, ktoré formovali priestor románskeho bazilikálneho usporiadania až po jeho súčasnú podobu po liturgickej reforme Druhého vatikánskeho koncilu.

Aj napriek tomu, že nie všetky prvky – najmä v interiéri – boli v pôvodnom architektonicko-historickom, archívnom alebo inom výskume jednoznačne potvrdené, práca sa snaží poukázať aj na alternatívne možnosti interiérového usporiadania (vždy uvedené v texte), vychádzajúce z analógií najmä v rámci európskeho kontextu.

Za najmenej pravdepodobnú možno považovať hypotetickú rekonštrukciu štvrtej etapy, reprezentujúcu neskorobarokové prestavby, ktorá vykazuje najväčšie disproporcie v porovnaní s ostatnými vývojovými fázami. Identifikované nepresnosti môžu súvisieť s nesprávnou interpretáciou architektonicko-historického výskumu, predovšetkým vedút, z ktorých bolo primárne čerpané, prípadne s voľbou menej vhodných analógií či proporčných východísk v úvodných fázach spracovania.

Hypotetická rekonštrukcia však v každom prípade umožnila lepšie pochopiť nielen architektonickú nadväznosť jednotlivých prestavieb, ale aj ich vzťah k liturgickej funkcii a vývoju sakrálneho priestoru v širšom kultúrno-historickom kontexte.

Literatúra

[1] ŠIMKOVIC, Michal, Zuzana ZVAROVÁ, Peter BUDAY, Mikuláš ČELKO, Stefan ORIŠKO a Karol ĎURIAN. *Umelecko-historický a architektonicko-historický výskum r.k. farského kostola Nanebovzatia Panny Márie*. 2017.

[2] TERAO VOŠKOVÁ, Katarína a Lýdia BUDAYOVÁ. Medieval Sacral Architecture in Banská Štiavnica-Architectural Interpretation Lýdia Budayová-Katarína Terao Vošková [online]. 2025, **13**(1), 87–112. Dostupné z: doi:10.46284/mkd.2025.13.1.5nnn

[3] LUKÁČOVÁ, E, M BAŠO, J KRIVOŠOVÁ, B DOHNÁNY, J HLINICKÝ, J ŠTIBRÁNYI, N HRAŠKOVÁ a D ŠOLTÉOVÁ. *Sakrálna architektúra na Slovensku*. Komárno: Vydavateľstvo Komárno, 1996. ISBN 80-88804-67-1.

[4] BUDAYOVÁ, Lýdia a Iveta CHOVANOVÁ. *Pamäť miesta / mesta*. Banská Štiavnica: Rímskokatolícka cirkev, farnosť Banská Štiavnica, 2022. ISBN 978-80-570-4460-4.

[5] SCHLOEDER, Steven J. *ARCHITECTURE in COMMUNION*. B.m.: Library of Congress, 1998. ISBN 0-89870-631-9.

[6] CHRISTIANITAS. *Všetko o oltári. Poznáte, čo znázorňujú jeho časti?* [online]. 2021. Dostupné z: https://christianitas.sk/vsetko-o-oltari-poznate-co-znazornuju-jeho-casti/

[7] POMFYOVÁ, Bibiana. LETNERY V STREDOVEKÝCH KOSTOLOCH NA SLOVENSKU. PRÍSPEVOK K STAVEBNÝM DEJINÁM MENDIKANTSKÝCH KLÁŠTOROV BIBIANA POMFYOVÁ. *Archaeologia historica* [online]. 2019, **44**, 715–747 [vid. 2025-09-02]. ISSN 0231-5823. Dostupné z: doi:10.5817/AH2019-2-10

[8] ADAM, Adolf. *Liturgika - Křesťanská bohoslužba a její vývoj*. Praha 1: Vyšehrad spol. s.r.o., 2001. ISBN 80-7021-420-1.

[9] LAUDONIU, Lucia. *Pergula a lektórium ako most k Bohu* [online]. 24. květen 2021 [vid. 2025-07-24]. Dostupné z: https://christianitas.sk/latinske-ikonostasy-pergula-a-lektorium-ako-most-k-bohu-diel-druhy/

[10] RICHTER, Klemens. *Liturgie a život* . Praha : Vyšehrad, spol. s.r.o., 2003. ISBN 80-7021-575-5.

OpenAI (2025), ChatGPT, preklad textu abstraktu, kontrola gramatiky a reformulácie textu.

Jozef Olašák[1]
Študijný program: Teória konštrukcií pozemných stavieb, 3. ročník

KLIMATICKÝ PRÍNOS VEGETAČNÝCH STRIECH II: RETENCIA DAŽĎOVEJ VODY A MIKROKLIMATICKÁ FUNKCIA

THE CLIMATIC BENEFIT OF GREEN ROOFS II: RAINWATER RETENTION AND MICROCLIMATIC FUNCTION

Abstract
Green roofs represent an important adaptation element in urban environments, helping to mitigate the negative impacts of climate change through microclimate regulation, rainwater retention, and air quality improvement. This paper follows the author's previous study *The climatic benefit of green roofs (2024)* and expands the topic to include environmental, hydrological, and social aspects. The focus is placed on the retention and filtration functions of green roofs, their ability to capture pollutants, support urban biodiversity, and enhance psychological well-being. A synthesis of available research confirms that green roofs can retain 60–100% of rainfall depending on rainfall intensity and vegetation type, reduce concentrations of PM_{10} and NO_2 in the air, capture heavy metals in runoff, and lower noise levels by 3–4 dBA. In addition to environmental benefits, they improve microclimatic conditions and urban quality of life, representing a complex and multifunctional element of sustainable urbanism with a key role in climate change adaptation.

Kľúčové slová
Vegetačná strecha; klimatická zmena, retencia dažďovej vody, mikroklíma, biodiverzita

1. Úvod

Problematika adaptácie miest na dôsledky klimatickej zmeny nadobúda v posledných desaťročiach čoraz väčší význam. Mestské prostredie je charakteristické vysokým podielom nepriepustných povrchov, ktoré prispievajú k prehrievaniu, zhoršovaniu kvality ovzdušia či k zvýšenej povrchovej odtokovej záťaži počas intenzívnych zrážkových udalostí. Tieto procesy majú za následok nielen zhoršenie mikroklimatických podmienok, ale aj rast rizika lokálnych záplav a zníženie kvality života obyvateľov. Jedným z efektívnych adaptačných opatrení, ktoré dokážu zmierniť tieto negatívne dôsledky urbanizácie, sú vegetačné strechy.

Predchádzajúci článok autora s názvom *Klimatický prínos vegetačných striech* [1] sa venoval predovšetkým klimatickým aspektom zelených striech, a to najmä ich schopnosti znižovať tepelné zaťaženie mestského prostredia, prispievať k energetickej efektívnosti budov a znižovať emisie skleníkových plynov. V článku boli analyzované mechanizmy, prostredníctvom ktorých vegetačné strechy ovplyvňujú tepelnú bilanciu budov, prispievajú k zmierneniu efektu mestského tepelného ostrova a zlepšujú vnútorný tepelný komfort. Výsledky naznačili, že vegetačné strechy predstavujú významný klimatický prvok, ktorý priamo ovplyvňuje mestskú mikroklímu a kvalitu prostredia.

Súčasný príspevok na uvedený výskum nadväzuje a rozširuje ho o environmentálne a hydrologické aspekty vegetačných striech, pričom dôraz je kladený na retenciu dažďovej vody, kvalitu odtoku, znižovanie znečistenia ovzdušia, podporu biodiverzity a príspevok k psychickej a fyzickej pohode

[1] Jozef Olašák, Ing.

človeka. Vegetačné strechy tak nie sú len stavebným alebo architektonickým prvkom, ale sú komplexným ekosystémom, ktorý spája klimatické, ekologické a sociálne funkcie. Cieľom tohto článku je predstaviť syntézu poznatkov o týchto multifunkčných prínosoch a poukázať na ich význam v kontexte adaptácie miest na klimatickú zmenu. Vegetačné strechy sú zároveň neoddeliteľnou súčasťou moderných stratégií hospodárenia so zrážkovými vodami (Sustainable Urban Drainage Systems – SUDS), ktoré kladú dôraz na lokálne zadržiavanie a spomalenie odtoku. Ich retenčný potenciál je významný nielen z hľadiska zmierňovania záťaže pri nárazových ďažďoch, ale aj z pohľadu mikroklimatickej regulácie, keďže procesy evapotranspirácie prispievajú k ochladzovaniu prostredia. Súčasne poskytujú biotopy pre rastliny a živočíchy, zlepšujú akustické podmienky a pozitívne vplývajú na psychickú pohodu obyvateľov.

Cieľom tohto článku je preto zhodnotiť environmentálne, hydrologické a mikroklimatické prínosy vegetačných striech, identifikovať ich hlavné funkčné mechanizmy a poukázať na ich význam v rámci udržateľného mestského rozvoja. Príspevok vychádza z analýzy vedeckých štúdií a experimentálnych meraní, pričom sa sústreďuje na hodnotenie účinnosti vegetačných striech pri zadržiavaní dažďovej vody, ovplyvňovaní kvality odtoku, znižovaní znečistenia ovzdušia a podpore biodiverzity v urbanizovanom prostredí.

2. Metodika a zdroje

Metodika spracovania vychádza z komparatívnej analýzy domácich a zahraničných vedeckých štúdií publikovaných v období rokov 2010 – 2025, zameraných na hydrologické, mikroklimatické a ekologické prínosy vegetačných striech. Cieľom bolo syntetizovať poznatky o ich retenčnej schopnosti, kvalite odtoku, vplyve na znečistenie ovzdušia, biodiverzitu a akustickú či psychologickú pohodu človeka.

Analýza zahŕňala experimentálne aj modelové štúdie hodnotiace účinnosť rôznych typov vegetačných systémov (extenzívne, polointenzívne, intenzívne) vegetačných striech. Pri hodnotení hydrologických funkcií boli sledované parametre retencie zrážok, oneskorenia odtoku a kvality vypúšťanej vody. V oblasti ekológie a kvality ovzdušia boli posudzované schopnosti vegetácie zachytávať prachové častice, plyny a podporovať druhovú rozmanitosť v mestskom prostredí.

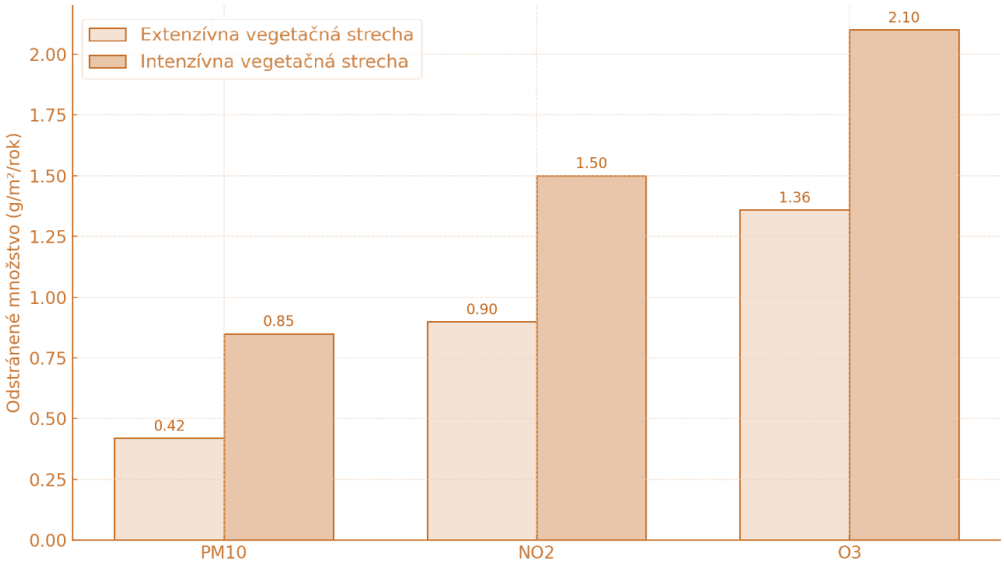
Cieľom metodiky nebolo uskutočniť nové meranie, ale zhodnotiť a porovnať dostupné výsledky výskumov, ktoré poukazujú na viacúrovňový klimatický a environmentálny prínos vegetačných striech v kontexte adaptácie miest na klimatickú zmenu.

3. Výsledky a diskusia

3.1 Zmiernenie znečistenia ovzdušia

Rastliny vo vegetačnej vrstve vegetačnej strechy prispievajú k zmierneniu znečistenia ovzdušia tak, že absorbujú plynné znečisťujúce látky cez prieduchy (stómy) listov. Prieduch (stóma) je štruktúra v pokožkových pletivách rastlín regulujúca výmenu plynov a výparov vody. Zohráva dôležitú úlohu pri príjme oxidu uhličitého a pri transpirácii. Transpirácia je vylučovanie vody povrchom rastlín v podobe vodnej pary [2][3]. Taktiež je potrebné spomenúť schopnosť rastlín zachytávať znečisťujúce látky prostredníctvom metabolických dráh. Vegetačné strechy majú schopnosť redukovať niekoľko typov znečisťujúcich látok, a to oxid dusičitý NO_2, ozón O_3, častice polietavého prachu PM10, oxid siričitý SO_2, jemné častice polietavého prachu PM2,5 [4][5][6]. Experimentálne merania dokázali že extenzívna vegetačná strecha vie odstrániť 0,42 g častíc polietavého prachu PM10 na m^2 vegetačnej strechy za rok [7], či znížiť znečistenie ovzdušia o 0,9 g oxidu dusičitého NO_2 a o 1,36 g ozónu O_3 na m^2 vegetačnej strechy za rok *(Obrázok 1)* [8]. Čo sa týka intenzívnej vegetačnej strechy výskum sa líši pri experimentálnom meraní a pri štúdiách

vykonávaných simulačným programom v značnom rozmedzí. Je však možné konštatovať, že intenzívne vegetačné strechy majú vyššiu schopnosť odstraňovať znečisťujúce látky zo vzduchu ako extenzívne vegetačné strechy.

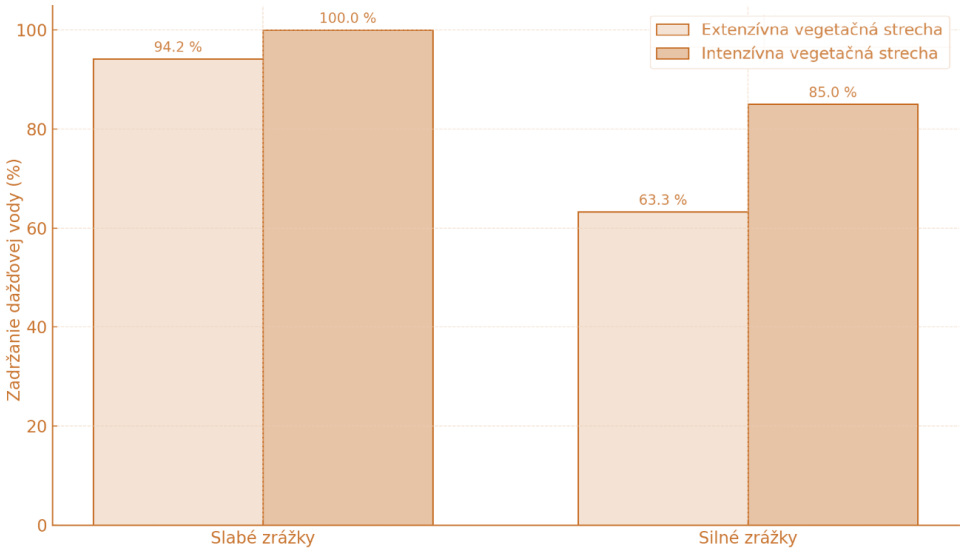


Obrázok 1: Vplyv vegetačných striech na mikroklímu na úrovni chodcov.

3.2 Zadržiavanie dažďovej vody

V súlade s poznatkami odbornej literatúry zohrávajú vegetačné strechy významnú úlohu pri zmierňovaní rizika záplav v mestskom prostredí, a to prostredníctvom dvoch kľúčových mechanizmov. Prvým mechanizmom je úplné zachytenie zrážkovej vody počas menej intenzívnych dažďových udalostí, zatiaľ čo druhý mechanizmus spočíva v znížení objemu odtoku prostredníctvom akumulácie podstatnej časti zrážok aj pri výdatnejších dažďoch [9][10]. Tretím mechanizmom je redukcia maximálnych prietokov počas intenzívnych zrážok, pričom vegetačné strechy oneskorujú odtok vody a tým zmierňujú zaťaženie mestských odvodňovacích systémov [11][12]. Zadržiavacia kapacita vegetačnej strechy je ovplyvnená nielen jej fyzikálnymi vlastnosťami, ale aj intenzitou zrážok. Vegetačné strechy prispievajú k znižovaniu odtoku prostredníctvom zachytávania vody vegetáciou, procesmi evapotranspirácie, infiltrácie a akumulácie v substráte [13]. Výskumy preukázali, že staršie vegetačné strechy dokážu efektívnejšie zadržiavať dažďovú vodu [14], čím predstavujú dlhodobú investíciu v oblasti manažmentu dažďových vôd v urbanizovanom prostredí. V literatúre panuje široká zhoda, že vegetačné strechy významne prispievajú k tlmeniu odtoku, pričom pri menej intenzívnych dažďoch, alebo po období sucha môžu zachytiť až 100 % zrážok [11][15][16][17]. Výskum tiež zaznamenal zadržiavanie dažďovej vody na úrovni 94,2 % pri slabších zrážkach a 63,3 % pri intenzívnejších dažďoch *(Obrázok 2)* [14]. Možno tiež konštatovať, že klimatické podmienky regiónu, v ktorom sa vegetačná strecha nachádza, významne ovplyvňujú jej schopnosť akumulovať dažďovú vodu. Vegetačné strechy dosahujú najvyššiu efektivitu v letných mesiacoch alebo v teplejších klimatických oblastiach, kde vyššie teploty podporujú intenzívnejšiu evapotranspiráciu, čo vedie k zvýšenej retencii vody. Možno tiež konštatovať, že klimatické podmienky regiónu, v ktorom sa vegetačná strecha nachádza, významne ovplyvňujú jej schopnosť akumulovať dažďovú vodu. Vegetačné strechy dosahujú najvyššiu efektivitu v letných mesiacoch alebo v teplejších klimatických oblastiach, kde vyššie teploty podporujú intenzívnejšiu evapotranspiráciu, čo vedie k zvýšenej retencii dažďových vôd [11]. Tieto zistenia teda naznačujú, že extenzívne aj intenzívne vegetačné strechy môžu prispieť k zadržiavaniu dažďovej vody naozaj významne, čím zohrávajú dôležitú úlohu v zmierňovaní intenzívnych zrážkových udalostí

v mestskom prostredí a zároveň znižujú zaťaženie mestských vodohospodárskych či kanalizačných systémov.



Obrázok 2: Schopnosť vegetačných striech zadržiavať dažďovú vodu pri rôznej intenzite zrážkovej činnosti.

3.3 Kvalita odtoku dažďovej vody

Vegetačné strechy predstavujú efektívny prvok v rámci udržateľného hospodárenia so zrážkovými vodami, a to nielen z hľadiska retencie, ale aj z pohľadu ovplyvňovania chemického zloženia odtoku. Ich hlavný filtračný mechanizmus spočíva v tom, že vegetačná a substrátová vrstva pôsobí ako pasívny sorpčný a retenčný systém, schopný zachytávať rôzne typy polutantov vrátane suspendovaných častíc, ťažkých kovov a nutrientov (napr. dusíka a fosforu), ktoré sú prítomné v atmosférických zrážkach alebo vznikajú rozkladom organického materiálu na streche [18]. Efektivita zelených striech pri redukcii koncentrácií znečisťujúcich látok vo výtoku je však variabilná a závisí od viacerých činiteľov, ako sú fyzikálno-chemické vlastnosti substrátu, druh použitých rastlín, dĺžka akumulačnej fázy zrážok a frekvencia dažďových udalostí. Literárne zdroje uvádzajú, že hoci v mnohých prípadoch dochádza k zníženiu koncentrácií sledovaných kontaminantov, v iných prípadoch môže dôjsť aj k ich zvýšenému uvoľňovaniu, najmä pri nedostatočnej stabilite substrátu alebo v dôsledku premnoženia nutrientov v biomase [18]. Prevažná časť existujúcich štúdií sa zameriava na tri kategórie kľúčových znečisťujúcich látok, a to najmä na fosfor, dusík a ťažké kovy (napr. zinok, meď, olovo), ktoré predstavujú významné riziko pre kvalitu povrchových vôd v mestskom prostredí. V prípade fosforu je jeho výskyt v odtoku z vegetačných striech ovplyvnený viacerými faktormi. Fosfor sa môže do dažďovej vody uvoľňovať nielen priamo zo zrážok, ale aj z hnojív aplikovaných do substrátu, ktoré podporujú rast a vitalitu vegetácie. Tento jav naznačuje, že vegetačné strechy môžu za určitých okolností fungovať ako sekundárny zdroj fosforového znečistenia [19]. Vzhľadom na to, že pri realizácii týchto systémov sa často používajú komerčné substráty a rastlinné druhy vyžadujúce intenzívnejšiu výživu, môže dôjsť k prechodnému zvýšeniu koncentrácie fosforu v odtoku [20]. Dlhodobejšie sledovania však potvrdzujú, že postupným vyplavením zvyškov počiatočných hnojív sa koncentrácia fosforu v čase znižuje [21]. Napríklad pri extenzívnych vegetačných strechách bola zaznamenaná dvojnásobná koncentrácia fosforu v odtoku v porovnaní s dažďovou vodou, pričom retenčná účinnosť sa menila v závislosti od ročného obdobia [22]. Naopak, pri intenzívnych vegetačných strechách boli zistené výrazne nižšie koncentrácie fosforu než v kontrolných prípadoch [23]. Podobné výsledky sa objavujú aj pri hodnotení dusíkatých zlúčenín. Vegetačné strechy môžu ovplyvniť kvalitatívne parametre odtoku v súvislosti s výskytom dusičnanového dusíka a amónneho dusíka [20]. V niektorých prípadoch boli

koncentrácie dusíka v odtoku z extenzívnych vegetačných striech vyššie ako v dažďovej vode, čo je pripisované prítomnosti organického materiálu a rozkladajúcej sa vegetácie [22]. Avšak polointenzívne vegetačné strechy a intenzívne vegetačné strechy preukázali zníženie koncentrácie celkového dusíka v porovnaní s obyčajnými nezatrávnenými strechami [24][23]. Pokiaľ ide o obsah ťažkých kovov, väčšina štúdií sa zhoduje, že vegetačné strechy predstavujú účinný prvok na ich zachytávanie. Kovy ako zinok, olovo, meď či železo sa môžu viazať na substrát, akumulovať v koreňovej zóne rastlín alebo sa zadržiavať v nadzemných častiach vegetácie [20]. V porovnaní s obyčajnými nezatrávnenými strechami boli na vegetačných strechách zaznamenané významne nižšie koncentrácie viacerých kovov. V niektorých prípadoch bolo zachytených viac než 60 % zinku a viac ako 70 % olova [21][25][26]. Celkovo možno konštatovať, že pokiaľ ide o fosfor a dusík, vplyv vegetačných striech na kvalitu odtoku nie je jednoznačný a závisí od špecifických podmienok daného systému. Naopak, pokiaľ ide o ťažké kovy, väčšina dostupných výskumov podporuje hypotézu, že vegetačné strechy zohrávajú pozitívnu úlohu v ich retencii a redukcii.

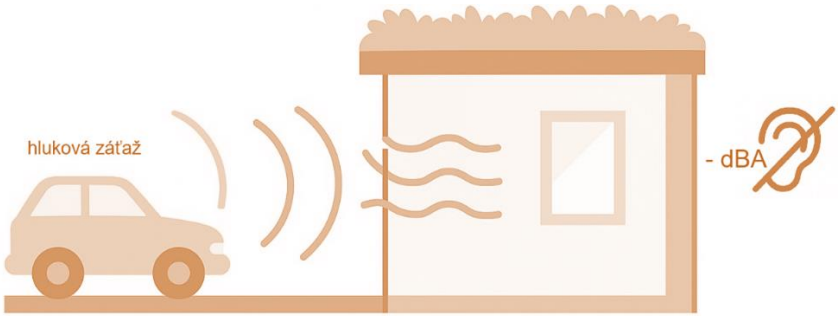
3.4 Zvýšenie biodiverzity

Primárny ekologický prínos vegetačných striech spočíva v ich schopnosti vytvárať životné prostredie pre rôzne druhy rastlín, bezstavovcov, vtákov či iných voľne žijúcich organizmov. Tento efekt je obzvlášť významný v mestskom prostredí, kde je rozsah prirodzenej zelene značne obmedzený a dominujú nepriepustné povrchy [27][28]. Ďalším významným ekologickým aspektom vegetačných striech je ich potenciál prepájať izolované zvyšky mestských biotopov. Týmto spôsobom podporujú kontinuitu ekologickej siete a umožňujú migráciu a šírenie rôznych druhov v rámci urbanizovanej krajiny [29]. Súhrn poznatkov z odbornej literatúry naznačuje, že ekologický prínos vegetačných striech pre mestskú biodiverzitu je ovplyvňovaný viacerými faktormi, ako sú napríklad vzdialenosť od iných zelených plôch, kvalitatívne parametre vytvoreného biotopu či plošné rozmery samotnej strechy. Porovnávania vegetačných striech s tradičnými zelenými plochami na úrovni terénu prinášajú nejednoznačné výsledky, pričom pozornosť sa sústreďuje najmä na dve základné zložky biodiverzity a to druhovú hustotu, teda početnosť jedincov v rámci rovnakého druhu, a druhovo-bohatostný index, teda počet zaznamenaných druhov. Vedecký výskum, ktorý sa zaoberal porovnaním diverzity hmyzu medzi intenzívnou vegetačnou strechou a trávnatou plochou so stromami na zemi, neodhalil štatisticky významné rozdiely ani v druhovej bohatosti, ani v početnosti jedincov [30][31]. Vedecká štúdia zas poukázala na to, že hoci druhová rozmanitosť bola vyššia na úrovni terénu než na strechách, rozdiely vo funkčnej hustote spoločenstiev neboli preukázané [32]. Porovnanie vegetačných striech s obyčajnými nezatrávneným zastrešením prináša samozrejme jednoznačné dôkazy o pozitívnom vplyve vegetačných striech na mestskú biodiverzitu. Výskum preukázal, že vegetačná strecha v ich štúdii výrazne podporovala druhovú rozmanitosť vtákov, článkonožcov a ulitníkov v porovnaní s architektonicky zhodnou obyčajnou nezatrávnenou strechou, pričom na vegetačnej streche boli zaznamenané aj niektoré lokálne vzácne a citlivé druhy [33]. Taktiež výskum ukazuje vyššiu druhovú hustotu aj bohatstvo vtáčích a článkonožcových spoločenstiev na vegetačných strechách, ktoré navyše slúžili ako dočasné stanovištia počas vtáčích migrácií [34]. Pri štúdii zameranej na ekologický potenciál rôznych typov vegetačných striech z hľadiska ich schopnosti podporiť osídlenie rezidentnými a migrujúcimi vtákmi, ako aj spontánnu kolonizáciu rastlinami. Zistenia naznačujú, že všetky typy vegetačných striech vykazovali výrazne vyššiu ekologickú hodnotu v porovnaní s bežnými nezatrávnenými strechami. Zaujímavým poznatkom však bolo, že extenzívne vegetačné strechy a polointenzívne vegetačné strechy priťahovali približne dvojnásobný počet vtáčích druhov v porovnaní s intenzívnymi vegetačnými strechami [35]. Vzdialenosť vegetačnej strechy od iných zelených prvkov výrazne ovplyvňuje mieru druhovej rozmanitosti, ktorú môže dané stanovište podporiť. Blízkosť vegetácie v okruhu 100 až 200 metrov vysvetľuje podstatnú časť variability v druhovom zložení rastlín, pričom takéto prepojenie uľahčuje prirodzenú migráciu semien a kolonizáciu druhmi zo susedných biotopov [36]. Okrem

horizontálnej vzdialenosti zohráva dôležitú úlohu aj vertikálna poloha strechy. Izolácia spôsobená výškovým umiestnením strešného ekosystému môže nepriaznivo ovplyvniť výskyt článkonožcov, najmä v prípadoch, keď chýba ekologická kontinuita s terénnymi plochami [37]. Výška budovy môže pôsobiť ako fyzická bariéra pre mnohé druhy, ktoré nedokážu efektívne osídliť strešné biotopy vo vyšších nadmorských výškach, a to ani prípade, že budova priamo susedí s verejnou zeleňou [38]. Napriek kvalitným vegetačným podmienkam teda vyššie položené vegetačné strechy vykazujú nižšiu mieru spontánneho osídlenia, než by bolo možné očakávať pri rovnakej ekologickej kvalite v nižšej nadzemnej úrovni. Dôležitým faktorom je aj samotná rozloha vegetačnej strechy. Väčšie strešné plochy poskytujú rozsiahlejšie a stabilnejšie prostredie pre osídlenie rastlinami a živočíchmi, čo sa prejavuje vyššou hustotou aj druhovým zastúpením [38]. Menšie a izolované strechy, naopak, nedokážu udržať určité populácie živočíchov, ak chýba priestorové prepojenie s ďalšími zelenými štruktúrami [39].

3.5 Zníženie hlukovej záťaže

K znižovaniu hlukovej záťaže prispievajú vegetačné strechy najmä tým, že vďaka svojim materiálovým vlastnostiam dokážu absorbovať zvukové vlny, čo v určitých situáciách vedie k výraznému poklesu hladiny hluku v urbanizovanom prostredí *(Obrázok 3)* [40]. Vďaka vrstve substrátu a vegetácie dokážu absorbovať a rozptyľovať zvukové vlny, čím sa znižuje prenos hluku z exteriéru do interiéru budov. Ich schopnosť znižovať akustickú záťaž je obzvlášť prínosná v oblastiach vystavených dopravnému hluku či iným zdrojom vonkajšieho hluku. Vedecké štúdie ukazujú, že vegetačné strechy môžu znížiť hladinu hluku o niekoľko decibelov, v závislosti od typu vegetácie, hrúbky substrátu a konštrukcie samotnej budovy. Výskum v oblasti vplyvu vegetačných striech na úroveň hlukovej záťaže preukázal, že extenzívna vegetačná strecha môže znížiť hluk z dopravy o 3 dBA v porovnaní s obyčajnou nezatrávnenou strechou [41]. Výskum tiež ukazuje zníženie hlukovej záťaže o 4 dBA pomocou polointenzívnej vegetačnej strechy [42]. Navyše, prínos vegetačných striech je obzvlášť zreteľný pri ľahkých stavebných konštrukciách, ktoré prirodzene disponujú nižšou zvukovou izoláciou [43]. Ďalej je možné konštatovať že pri vegetačných strechách menších rozmerov rozdiel v útlme hlukovej záťaže nie je významný, avšak pri vegetačných strechách väčších rozmerov a pri zastrešení vegetačnými strechami vo väčšom zastúpení budov je potenciálne zníženie hladiny hlukovej záťaže významne väčšie [41]. V širšom meradle môžu teda vegetačné strechy prispievať k zlepšeniu akustickej pohody, najmä ak sú uplatňované vo väčšom rozsahu.



Obrázok 3: Vegetačné strechy majú schopnosť znižovať akustickú záťaž.

3.6 Psychická a fyzická pohoda človeka

Vegetačné strechy zohrávajú čoraz významnejšiu úlohu nielen z ekologického a technického hľadiska, ale aj z pohľadu podpory ľudskej pohody v mestskom prostredí. Prítomnosť vegetácie na strechách pozitívne ovplyvňuje mikroklimatické podmienky, znižuje teplotu okolitého prostredia a zlepšuje kvalitu ovzdušia, čím prispieva k fyzickému komfortu obyvateľov. Okrem toho výskumy

poukazujú na psychologické benefity vegetačných prvkov – vizuálny kontakt so zeleňou znižuje stres, podporuje mentálnu rovnováhu a zvyšuje subjektívne vnímanie kvality života. Výskum [44] identifikoval niekoľko faktorov, ktoré ovplyvňujú vnímanie vegetačných striech a ich súvislosť s redukciou stresu. Výsledky výskumu [44] ukázali, že vegetačné strechy vizuálne narúšajúce jednotvárnosť betónových povrchov pôsobia na ľudí upokojujúco. Pozitívny efekt bol výraznejší, ak sa vegetácia nachádzala v zornom poli, teda vo výške očí a v menšej vzdialenosti. Navyše, trávnaté intenzívne vegetačné strechy vykazovali vyššiu účinnosť pri odbúravaní stresu v porovnaní s častejšie využívanými extenzívnymi vegetačnými strechami. Podobné zistenia priniesla aj vedecká štúdia [45], v ktorej respondenti pripisovali vyššiu psychologickú hodnotu polointenzívnym vegetačným strechám a intenzívnym vegetačným strechám než extenzívnym vegetačným strechám.
Iný vedecký výskum [46] potvrdil, že pravidelný pobyt na vegetačných strechách napomáha redukcii stresu a napätia. Zároveň sa ukázalo, že ľudia pripisovali psychickej pohode vyšší význam než iným výhodám, ako je podpora biodiverzity, zadržiavanie dažďovej vody či znižovanie hluku a znečistenia. Ďalšia vedecká štúdia [47] sa zamerala na účinok krátkodobého vizuálneho kontaktu so zeleňou na strechách. Výsledky naznačujú, že už niekoľkosekundový pohľad na vegetačnú strechu, v porovnaní s pohľadom na betónový povrch, dokáže pozitívne ovplyvniť schopnosť sústredenia sa. Vegetačné strechy tiež tlmia hluk, znižujú prašnosť a podporujú biodiverzitu, čo ďalej zvyšuje ich prínos pre celkové životné prostredie a pohodu mestských obyvateľov. Z týchto dôvodov sa stávajú súčasťou stratégií na zlepšovanie kvality života v urbanizovaných zónach a významným prvkom udržateľného mestského rozvoja.

4. Záver

Vegetačné strechy predstavujú komplexný nástroj adaptácie miest na dôsledky klimatickej zmeny, ktorého význam presahuje rámec architektonického alebo estetického riešenia. Výsledky syntézy dostupných výskumov potvrdzujú, že vegetačné strechy významne prispievajú k zlepšeniu mikroklimatických, hydrologických a ekologických podmienok v urbanizovanom prostredí.

Z hľadiska hydrologických funkcií dosahujú vysokú retenčnú účinnosť, ktorá sa pri menej intenzívnych dažďoch blíži až k 100 %, pričom efektívne znižujú maximálne prietoky a oneskorujú odtok dažďovej vody. Kvalitatívne parametre odtoku poukazujú na schopnosť substrátovej vrstvy zachytávať ťažké kovy a suspendované častice, čím vegetačné strechy prispievajú k ochrane povrchových vôd. Z environmentálneho hľadiska je preukázaný ich pozitívny vplyv na redukciu znečistenia ovzdušia, najmä prostredníctvom adsorpcie a zachytávania častíc polietavého prachu či plynných polutantov. Okrem hydrologických a klimatických funkcií majú vegetačné strechy významný ekologický prínos – zvyšujú druhovú rozmanitosť, podporujú ekologickú konektivitu a prispievajú k tvorbe nových mestských biotopov. Zároveň znižujú akustickú záťaž a pozitívne vplývajú na psychickú pohodu obyvateľov, čím sa stávajú významným prvkom pre zlepšenie kvality života v mestách. Ich celkový prínos preto presahuje hranice stavebných riešení a dotýka sa aj urbanistického, ekologického a spoločenského rozvoja miest.

Na základe týchto poznatkov možno konštatovať, že vegetačné strechy predstavujú viacúrovňový adaptačný systém, ktorý integruje ekologické, technické a sociálne funkcie. Ich širšia implementácia do mestskej výstavby a územného plánovania je preto kľúčová pre udržateľný rozvoj a zvýšenie klimatickej odolnosti urbanizovaných území.

Literatúra

[1] Olašák Jozef. Klimatický prínos vegetačných striech. Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering 2024:261–8.

[2] Nowak DJ. Institutionalizing urban forestry as a “biotechnology” to improve environmental quality. Urban For Urban Green 2006;5:93–100. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.04.002.

[3] Nowak DJ, Hirabayashi S, Bodine A, Greenfield E. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. Environmental Pollution 2014;193:119–29. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.05.028.

[4] Petroff A, Mailliat A, Amielh M, Anselmet F. Aerosol dry deposition on vegetative canopies. Part I: Review of present knowledge. Atmos Environ 2008;42:3625–53. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.043.

[5] Nowak DJ, Hirabayashi S, Bodine A, Hoehn R. Modeled PM2.5 removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects. Environmental Pollution 2013;178:395–402. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.050.

[6] Salmond JA, Tadaki M, Vardoulakis S, Arbuthnott K, Coutts A, Demuzere M, Dirks KN, Heaviside C, Lim S, Macintyre H, McInnes RN, Wheeler BW. Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. Environmental Health 2016;15:S36. https://doi.org/10.1186/s12940-016-0103-6.

[7] Speak AF, Rothwell JJ, Lindley SJ, Smith CL. Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. Atmos Environ 2012;61:283–93. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.043.

[8] Arbid Y, Richard C, Sleiman M. Towards an experimental approach for measuring the removal of urban air pollutants by green roofs. Build Environ 2021;205:108286. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108286.

[9] Carson TB, Marasco DE, Culligan PJ, McGillis WR. Hydrological performance of extensive green roofs in New York City: observations and multi-year modeling of three full-scale systems. Environmental Research Letters 2013;8:024036. https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024036.

[10] Kuoppamäki K. Vegetated roofs for managing stormwater quantity in cold climate. Ecol Eng 2021;171:106388. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106388.

[11] Amy C. Moran, William F. Hunt. Green Roof Hydrologic and Water Quality Performance in North Carolina. 2005 Tampa, FL July 17-20, 2005, St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers; 2005. https://doi.org/10.13031/2013.19024.

[12] Johannessen BG, Muthanna TM, Braskerud BC. Detention and Retention Behavior of Four Extensive Green Roofs in Three Nordic Climate Zones. Water (Basel) 2018;10:671. https://doi.org/10.3390/w10060671.

[13] Stovin V, Vesuviano G, Kasmin H. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. J Hydrol (Amst) 2012;414–415:148–61. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.022.

[14] Getter KL, Rowe DB, Andresen JA. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. Ecol Eng 2007;31:225–31. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.06.004.

[15] Carter TL, Rasmussen TC. Hydrologic behavior of vegetated roofs. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 2006;42:1261–74. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb05299.x.

[16] Mentens J, Raes D, Hermy M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? Landsc Urban Plan 2006;77:217–26. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010.

[17] Villarreal EL. Runoff detention effect of a sedum green-roof. Hydrology Research 2007;38:99–105. https://doi.org/10.2166/nh.2007.031.

[18] Gong Y, Hao Y, Li J, Li H, Shen Z, Wang W, Wang S. The Effects of Rainfall Runoff Pollutants on Plant Physiology in a Bioretention System Based on Pilot Experiments. Sustainability 2019;11:6402. https://doi.org/10.3390/su11226402.

[19] Czemiel Berndtsson J. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. Ecol Eng 2010;36:351–60. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014.

[20] Li Y, Babcock RW. Green roofs against pollution and climate change. A review. Agron Sustain Dev 2014;34:695–705. https://doi.org/10.1007/s13593-014-0230-9.

[21] Van Seters T, Rocha L, Smith D, MacMillan G. Evaluation of Green Roofs for Runoff Retention, Runoff Quality, and Leachability. Water Quality Research Journal 2009;44:33–47. https://doi.org/10.2166/wqrj.2009.005.

[22] Carpenter CMG, Todorov D, Driscoll CT, Montesdeoca M. Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring observations. Environmental Pollution 2016;218:664–72. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.056.

[23] Speak AF, Rothwell JJ, Lindley SJ, Smith CL. Metal and nutrient dynamics on an aged intensive green roof. Environmental Pollution 2014;184:33–43. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.08.017.

[24] Ferrans P, Rey CV, Pérez G, Rodríguez JP, Díaz-Granados M. Effect of Green Roof Configuration and Hydrological Variables on Runoff Water Quantity and Quality. Water (Basel) 2018;10:960. https://doi.org/10.3390/w10070960.

[25] Okita J, Poor C, Kleiss JM, Eckmann T. Effect of green roof age on runoff water quality in Portland, Oregon. Journal of Green Building 2018;13:42–54. https://doi.org/10.3992/1943-4618.13.2.42.

[26] Gnecco I, Palla A, Lanza LG, La Barbera P. The Role of Green Roofs as a Source/sink of Pollutants in Storm Water Outflows. Water Resources Management 2013;27:4715–30. https://doi.org/10.1007/s11269-013-0414-0.

[27] Joimel S, Grard B, Auclerc A, Hedde M, Le Doaré N, Salmon S, Chenu C. Are Collembola "flying" onto green roofs? Ecol Eng 2018;111:117–24. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.002.

[28] Madre F, Vergnes A, Machon N, Clergeau P. Green roofs as habitats for wild plant species in urban landscapes: First insights from a large-scale sampling. Landsc Urban Plan 2014;122:100–7. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.012.

[29] Braaker S, Ghazoul J, Obrist MK, Moretti M. Habitat connectivity shapes urban arthropod communities: the key role of green roofs. Ecology 2014;95:1010–21. https://doi.org/10.1890/13-0705.1.

[30] MacIvor JS, Lundholm J. Insect species composition and diversity on intensive green roofs and adjacent level-ground habitats. Urban Ecosyst 2011;14:225–41. https://doi.org/10.1007/s11252-010-0149-0.

[31] MacIvor JS, Lundholm J. Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. Ecol Eng 2011;37:407–17. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.10.004.

[32] Braaker S, Obrist MK, Ghazoul J, Moretti M. Habitat connectivity and local conditions shape taxonomic and functional diversity of arthropods on green roofs. Journal of Animal Ecology 2017;86:521–31. https://doi.org/10.1111/1365-2656.12648.

[33] Wooster EIF, Fleck R, Torpy F, Ramp D, Irga PJ. Urban green roofs promote metropolitan biodiversity: A comparative case study. Build Environ 2022;207:108458. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108458.

[34] Partridge DR, Clark JA. Urban green roofs provide habitat for migrating and breeding birds and their arthropod prey. PLoS One 2018;13:e0202298. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202298.

[35] Deng H, Jim CY. Spontaneous plant colonization and bird visits of tropical extensive green roof. Urban Ecosyst 2017;20:337–52. https://doi.org/10.1007/s11252-016-0596-3.

[36] Aloisio JM, Palmer MI, Tuininga AR, Lewis JD. Introduced and native plant species composition of vacant unmanaged green roofs in New York City. Urban Ecosyst 2020;23:1227–38. https://doi.org/10.1007/s11252-020-00992-6.

[37] Fabián D, González E, Sánchez Domínguez MV, Salvo A, Fenoglio MS. Towards the design of biodiverse green roofs in Argentina: Assessing key elements for different functional groups of arthropods. Urban For Urban Green 2021;61:127107. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127107.

[38] MacIvor JS, Ksiazek K. Invertebrates on Green Roofs, 2015, p. 333–55. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14983-7_14.

[39] Kyrö K, Kotze DJ, Müllner MA, Hakala S, Kondorosy E, Pajunen T, Vilisics F, Lehvävirta S. Vegetated roofs in boreal climate support mobile open habitat arthropods, with differentiation between meadow and succulent roofs. Urban Ecosyst 2020;23:1239–52. https://doi.org/10.1007/s11252-020-00978-4.

[40] Dzhambov A, Dimitrova D. Urban green spaces′ effectiveness as a psychological buffer for the negative health impact of noise pollution: A systematic review. Noise Health 2014;16:157. https://doi.org/10.4103/1463-1741.134916.

[41] Van Renterghem T, Botteldooren D. Influence of rainfall on the noise shielding by a green roof. Build Environ 2014;82:1–8. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.025.

[42] Yang HS, Kang J, Choi MS. Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level. Build Environ 2012;50:44–55. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.10.004.

[43] Galbrun L, Scerri L. Sound insulation of lightweight extensive green roofs. Build Environ 2017;116:130–9. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.008.

[44] Loder A. ‘There’s a meadow outside my workplace’: A phenomenological exploration of aesthetics and green roofs in Chicago and Toronto. Landsc Urban Plan 2014;126:94–106. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.008.

[45] Williams KJH, Lee KE, Sargent L, Johnson KA, Rayner J, Farrell C, Miller RE, Williams NSG. Appraising the psychological benefits of green roofs for city residents and workers. Urban For Urban Green 2019;44:126399. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126399.

[46] Rezaei M, Emmanuel N, Kim J, Kim DH. Analyzing the Impact of Green Roof Functions on the Citizens’ Mental Health in Metropolitan Cities. Iran J Public Health 2021. https://doi.org/10.18502/ijph.v50i5.6107.

[47] Lee KE, Williams KJH, Sargent LD, Williams NSG, Johnson KA. 40-second green roof views sustain attention: The role of micro-breaks in attention restoration. J Environ Psychol 2015;42:182–9. https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2015.04.003.

***Jana Pijáková*[1]**
Programme: Theory and Structures of Buildings, year:3rd

Evaluation of Mercury Intrusion Porosimetry for the Assessment of Radon Exhalation

Vyhodnocovanie ortuťovej porozimetrie pre posúdenie exhalácie radónu

Abstract
Mercury intrusion porosimetry (MIP) serves as an invaluable technique in characterizing the porous structure of various materials, specially building materials, with significant implications for understanding radon exhalation. Radon, a radioactive gas, poses serious health risks, making the study of its behaviour particularly pertinent in radon-prone areas. This review synthesizes existing literature on MIP, porosity, and the mechanisms through which building materials influence radon exhalation rates.

Key Words
Mercury intrusion porosimetry, porosity, pores, radon, radon exhalation

Abstrakt
Ortuťová porozimetria (MIP) slúži ako neoceniteľná technika pri charakterizácii pórovitej štruktúry rôznych materiálov, najmä stavebných materiálov, s významnými dôsledkami pre pochopenie exhalácie radónu. Radón, rádioaktívny plyn, predstavuje vážne zdravotné riziká, vďaka čomu je štúdium jeho správania obzvlášť dôležité v oblastiach s výskytom radónu. Táto prehľadová štúdia syntetizuje existujúcu literatúru o MIP, pórovitosti a mechanizmoch, prostredníctvom ktorých stavebné materiály ovplyvňujú rýchlosť exhalácie radónu.

Kľúčové slová
Ortuťová porozimetria, porozita, póry, radon, exhalácia radónu

1. Introduction

Indoor radon concentration, a significant public health hazard directly linked to lung cancer incidence, is substantially controlled by the exhalation of radon from building materials. The rate of this exhalation is not a simple function of the material's composition but is critically governed by its internal pore structure. Therefore, understanding the dynamics of radon transport and emission requires a detailed characterization of the material's porosity, pore size distribution, and pore network connectivity.

Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) is a widely utilized technique for precisely evaluating these pore structure characteristics. The method, which involves the pressurized intrusion of non-wetting mercury, provides quantitative data on pore size distribution and structural features. This level of detail is essential because radon gas, once emanated from the solid matrix, must navigate this interconnected pore network to be exhaled.

A critical capability of MIP, as noted by researchers, is its effectiveness in identifying the "interconnecting windows" and critical pore diameters that define the connected pathways within a material [1,2]. It is these pathways, rather than the absolute void sizes, that dictate the fluid and gas transport properties of the medium. Consequently, MIP data, often interpreted using the Washburn equation to determine pore size distributions [3,4], offers a powerful means to analyze the mechanisms governing radon release.

1.1 Background

Radon emanation followed by its exhalation is prominently influenced by the porosity of building materials. MIP is a technique that measures the pore structure of materials, allowing researchers to assess how pore characteristics relate to radon behaviour. The understanding of radon exhalation dynamics not only aids in health hazard assessments but also informs construction practices

1.2 Importance of Studying Radon Exhalation

Radon exhalation from building materials is a significant contributor to indoor radon levels, which has been linked directly to lung cancer incidence. Results of 3 pooling studies in Europe, North America and China were summarized in the WHO handbook on indoor radon: a public health perspective [5]. With the increasing focus on maintaining healthy living environments, the relationship between building materials' porosity and radon emission becomes critically important.

2. Porosity of Building Materials

Porosity refers to the ratio of the volume of void spaces within a material to the total volume. It is important to state that, as the measured pore sizes ranged from <2 nm to 300 nm, the microporosity refers to pores smaller than 2 nm, the mesoporosity indicates pores from 2 nm to 50 nm, while hereafter the meso- and macroporosity refer to pores with sizes from 2 nm to 300 nm.
High porosity typically correlates with increased radon exhalation rates as more pathways exist for gas escape. Therefore, understanding the intrinsic porosity characteristics of building materials reveals essential insights into correct assessment of radon accumulations.

3. Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)

Mercury porosimetry is characterization technique for porous materials. Pores between about 500 µm and 3.5 nm can be investigated. A complete analysis may take as little as half an hour of analysis time. Mercury porosimetry provides a wide range of information, e.g. the pore size distribution, the total pore volume or porosity, the skeletal and apparent density, and the specific surface area of a sample. No other porosity characterization technique can achieve this. However, one should realize that mercury porosimetry also has limitations. One of the most important limitations is the fact that it measures the largest entrance towards a pore (see Figure 1), but not the actual inner size of a pore. For obvious reasons it can also not be used to analyse closed pores, since the mercury has no way of entering that pore. Through various software techniques an interpretation of the pore-network (cross-linking structure between pores) can be achieved. However, one should realize that numerous assumptions are made in that process and the final results are somewhat arbitrary [6].

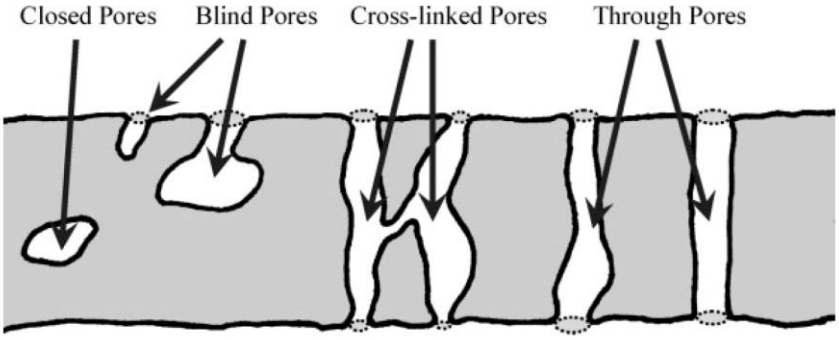


Fig. 1: Schematic representation of pores.

3.1 The Principle of MIP

MIP operates on the principle of capillary pressure, wherein mercury intrudes into the pores of a material at different pressures. A key assumption in mercury porosimetry is the pore shape. Essentially all instruments assume a cylindrical pore geometry. It relates the pressure difference across the curved mercury interface to the corresponding pore size using the surface tension of mercury and the contact angle between the solid and mercury. When water is present in the pores of a material, it can cause several discrepancies in results. The real pore shape is however quite different and the cylinder pore assumption can lead to major differences between the analysis and reality but still it´s the most enhanced technique for porosity assessment.

3.2 Factors Influencing MIP Readings

Diverse factors like pore structure connectivity, material density, and mercury's physical properties can influence MIP readings. For instance, the hysteresis observed between intrusion and extrusion curves during the mercury intrusion process indicates a complex interaction within the pore geometry.
Water has a much lower surface tension than mercury, which can result in the mercury not being able to intrude effectively into the pores that are partially occupied or fully saturated with water. The interaction between mercury and water leads to contact angle hysteresis effects, which can distort the results obtained from the intrusion process, resulting in inaccuracies in the assessment of pore size and volume and may even cause distortion of pores during the measurement. To avoid

discrepancies or sample damage its recommended to run measurement on dried samples or use different methods eg, Nitrogen Adsorption or Nuclear Magnetic Resonance Imaging. Additionally, factors such as temperature and air humidity in laboratory during the measurement can skew the results, necessitating standardized practices in MIP testing [6].

4. Sample MIP reading

To demonstrate data received from mercury intrusion porosimetry, relevant for assessment of building materials, is used sample of ordinary portland cement mortar. The prism was dried in a laboratory oven at 30 °C until it reached constant mass to remove moisture from curing. The sample of 4 x 4 x 10 mm had a density of 2,23 g/cm^3. The mercury intrusion porosimetry measurement was run in Quantachrome PoreMaster 33GT and analysed using PoreMaster software. This device detects following pore size ranges:

- low pressure 1.5 - 350 kPa (0.2 - 50 psi): intrusion 950 - 4.26µm
- high pressure140 kPa - 231 MPa (20 - 33000 psi) intrusion: 10.66 - 0.0064µm

All presented results are of my own.

4.1 Raw Pore Volume

The first characteristic which we can observe is pore volume in cubic centimetres (cc) intruded by mercury under pressure (see Figure 2). The bulk sample volume is 0.3324 cm^3. The raw volume represents the absolute volume of pores measured in a sample. It's a direct measurement of the space occupied by pores within the sample and is dependent on the size and mass of the specific sample being analysed, eg. the larger the sample, the larger raw pore volume. It is not useful for comparing samples of different masses.

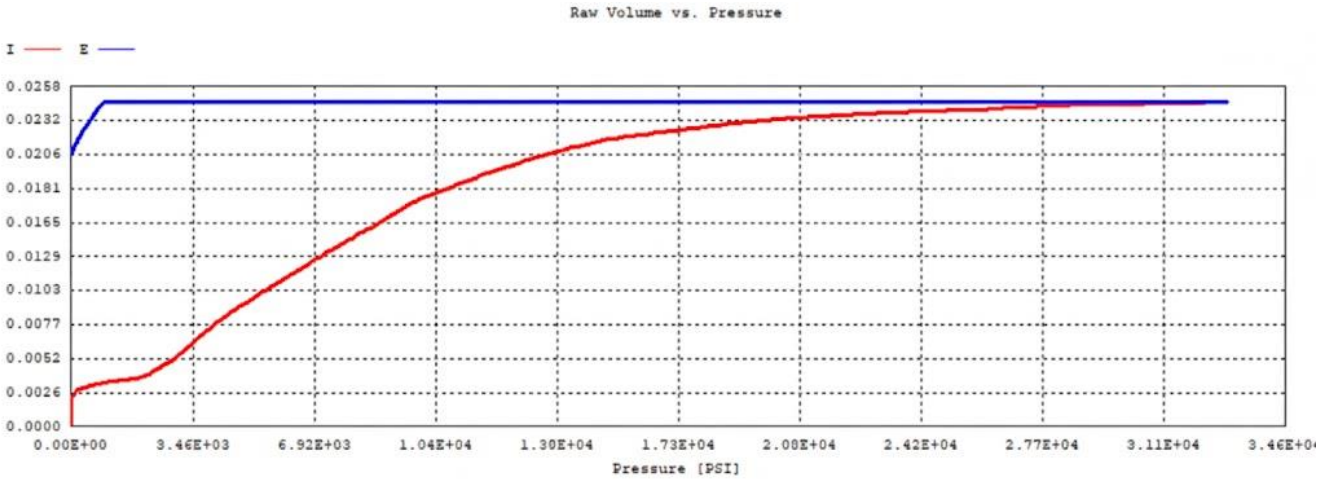


Fig. 2: Raw pore volume in cubic centimetres intruded (red curve) and extruded (blue curve) by mercury under pressure PSI.

4.2 Normalized Pore Volume

To compare porosity of samples of different mass, volume and density, standardization is required. That is allowed by dividing pore volume by mass of the sample. The normalized pore volume intruded by mercury under pressure for reference sample with volume of 0.3324 cc and mass of 0,7416 g is below (see Figure 3).

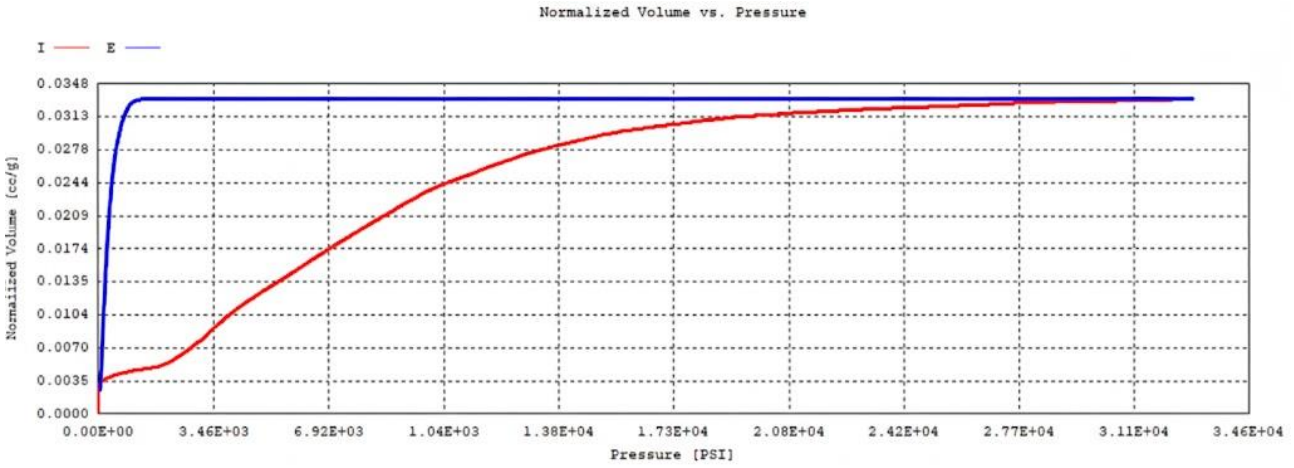


Fig. 3: Normalized pore volume in cubic centimetres / grams intruded (red curve) and extruded (blue curve) by mercury under pressure PSI (pounds per square inch).

Let's examine and example to demonstrate necessity of results normalization. Comparison of two samples:
Sample 1: Raw pore volume = 10 cc, Mass = 20 g
Sample 2: Raw pore volume = 15 cc, Mass = 50 g
If just the raw pore volume is key parameter then Sample 2 has higher porosity. However, when the data are normalized:
Sample 1: Normalized pore volume = 10 cc / 20 g = 0.5 cc/g
Sample 2: Normalized pore volume = 15 cc / 50 g = 0.3 cc/g
Now Sample 1 actually has a higher pore volume per unit mass, indicating a higher porosity.

4.3 Pore Size

After understanding normalization all following data are presented as normalized.
Based on principle described in previous chapter pore size, specifically diameter of pore entrance in µm can be read (see Figure 4).

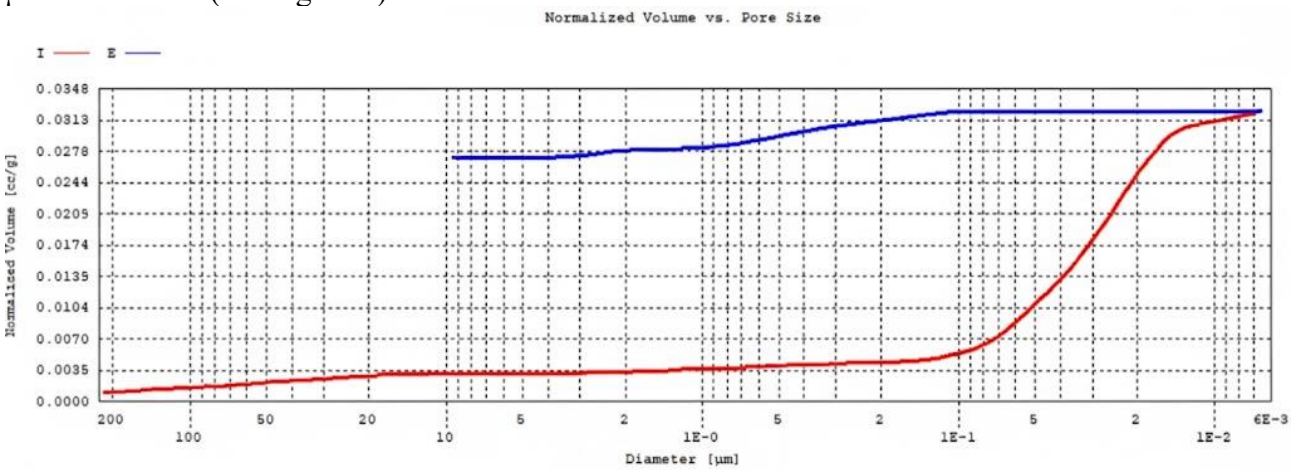


Fig. 4: Pore diameter in micrometres intruded (red curve) and extruded (blue curve) by mercury of cubic centimetres per grams.

4.4 Pore Size Histogram

To analyse pores and behaviour of substances within a material is important to specify content of pores with certain diameters through which molecules can be transported. This is allowed by histogram (see Figure 5).

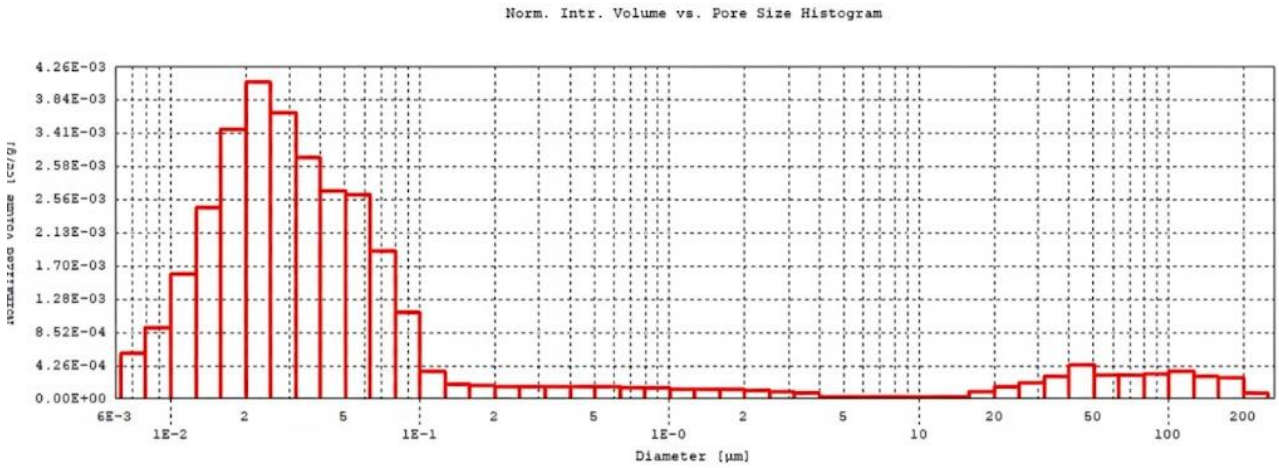


Fig. 5: Histogram of pore diameter in micrometres for volume in cubic metres by grams.

5. Radon Emanation and Exhalation mechanisms

Radon atoms located within solid grains are unlikely to become available for release to the atmosphere, owing to their very low diffusion coefficients in solids. However, if they are located in the interstitial space between grains, they may diffuse to the surface. Therefore, releases of radon from a residue repository to the atmosphere take place by the following series of processes [7]:

a.) Emanation — radon atoms formed from the decay of radium escape from the grains (mainly because of recoil) into the interstitial space between the grains,
b.) Transport — diffusion and advective flow cause the movement of the emanated radon atoms through the residue or soil profile to the ground surface,
c.) Exhalation — radon atoms that have been transported to the ground surface and then exhaled to the atmosphere (see Figure 6).

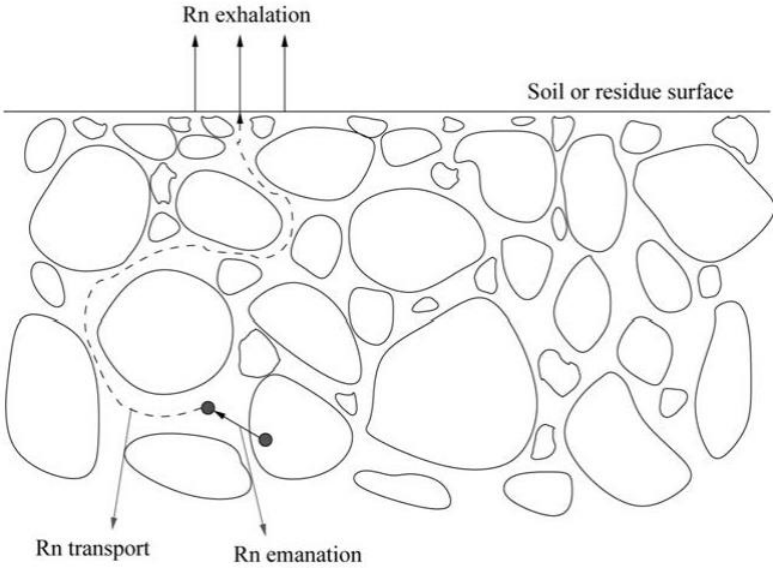


Fig. 6: Processes leading to radon release to the atmosphere [7].

Radon emanation coefficients are paramount in understanding how radon migrates from its source material to the atmosphere. The emanation coefficient describes the fraction of radon produced in the material that escapes into the air, with values ranging from 0 (no escape) to 1 (complete escape) [8].

5.1 Factors Influencing Radon Exhalation Rates

The exhalation of radon is influenced by material porosity, structural density, and the moisture content within the materials. Porous materials allow for greater movement of radon gas, while denser materials with lower porosity tend to inhibit radon migration [9].
Another factor which should be taken into consideration is the covalent atomic radius. It is a measure of the size of an atom that forms part of one covalent bond. It is usually measured either in picometres (pm) or angstroms (Å), with 1 Å = 100 pm. Estimated radon covalent radius is 1,5 Å = 150 pm [10].
The atomic covalent radius allows us to assess porosity just for certain diameters through which atoms of radon can be transferred. For radon it is approximately 300 pm = 0,003 µm.

6. Implications for Building Practices

Recent empirical studies illustrate the variability of radon exhalation rates across different building materials. For example, ceramic tiles showed lower radon emanation coefficients when compared to more porous materials like concrete and bricks [9]. It is crucial to consider not just the average porosity but also the specific pore size distributions in different material types [8].

Geographic factors have a notable impact on radon levels, with varying soil types contributing to different radon exhalation characteristics when linked to building materials [8]. Moreover, factors like local climate, soil composition, and construction practices exacerbate this variability, necessitating region-specific studies on radon management.

Materials with lower radon emanation coefficients should be prioritized in regions susceptible to radon accumulation from soil or in buildings where materials exhalating radon are used so the levels regulated by national code are not exceeded. Selection criteria should weigh porosity alongside other characteristics like thermal and structural integrity.

The measurements suggest that materials such as concrete has low radium activity concentration index, around 16 Bq/kg^{-1} due to limited content of natural occurred radioactive material in comparison to raw materials as granite 53-298 Bq/kg^{-1} or clay based materials like tiles with 50-97 Bq/kg^{-1} [9].
Special regulation should cover recycled material, eg, rubbel from demolition of buildings constructed before legislation regulated radioactivity of building materials. This material is often used as replacement of gravel under foundation.

7. Conclusion

This review underscores the critical relationship between MIP results, material porosity, and radon exhalation dynamics. Future research should embrace multidisciplinary approaches to encompass geological, environmental, and structural engineering perspectives [8]. Additionally, understanding interactions between humidity, temperature, and micro porosity will enrich the current knowledge base on radon exhalation [11].

In conclusion, the integration of MIP data with radon emanation studies provides a robust framework for assessing and mitigating radon-related health risks in buildings. By prioritizing materials with favorable porosity characteristics and adhering to stringent regulatory standards, we can create safer and healthier living spaces.

Literature

[1] BARBETTA, A. and CAMERON, N., 2004. Morphology and surface area of emulsion-derived (polyhipe) solid foams prepared with oil-phase soluble porogenic solvents: span 80 as surfactant. *Macromolecules*. 37(9), pp. 3188-3201. https://doi.org/10.1021/ma0359436

[2] TOLENTINO, E., LAMEIRAS, F., GOMES, A., SILVA, C. and VASCONCELOS, W., 2002. Structural evaluation and performance of portland cement concretes after exposure to high temperatures. *Materials Research*. 5(1), pp. 27-36. https://doi.org/10.1590/s1516-14392002000100005

[3] PORCHERON, F., THOMMES, M., AHMAD, R. and MONSON, P., 2007. Mercury porosimetry in mesoporous glasses: a comparison of experiments with results from a molecular model. *Langmuir*. 23(6), pp. 3372-3380. https://doi.org/10.1021/la063080e

[4] CEBECI, O., n.d. *Mercury intrusion porosimetry theory and its application to air-entrained cement pastes and mortars*. [online]. Available from: https://doi.org/10.31274/rtd-180817-4556

[5] WORLD HEALTH ORGANIZATION: *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*. Edited by H. YEEB and F. SHANNOUN. Geneva: World Health Organization, 2009. Available from: https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673

[6] GIESCHE, A.: Mercury porosimetry: a general (practical) overview. Journal of Colloid and Interface Science. 2006, vol. 293, no. 2, p. 344-353.

[7] MOED, Bernard A., NAZAROFF, William W. and SEXTRO, Richard G.: Soil as a source of indoor radon: generation, migration and entry. In: NAZAROFF, William W. and NERO Jr., Anthony V., eds. Radon and its decay products in indoor air. New York: John Wiley and Sons, 1988, p. 57–112

[8] GAO, Z. and HU, Q.: Estimating permeability using median pore-throat radius obtained from mercury intrusion porosimetry. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2013, vol. 10, no. 2, p. 025014. DOI 10.1088/1742-2132/10/2/025014.

[9] KUZMANOVIĆ, P., et al.: The influence of building material structure on radon emanation. *Journal of Radiological Protection*. 2022, vol. 42, no. 4, p. 041508. DOI 10.1088/1361-6498/aca59d.

[10] CORDERO, B., GÓMEZ, V., PLATERO-PRATS, A., et al.: Covalent radii revisited. *Dalton transactions (Cambridge, England : 2003)*. 2008, vol. 21, p. 2832-8. DOI 10.1039/b801115j.

[11] GIJBELS, K., et al.: The influence of porosity on radon emanation in alkali-activated mortars containing high volume bauxite residue. *Construction and Building Materials*. 2021, vol. 290, p. 123088.

Barbora Porkertová [1]
Študijný program: D-TKPS, ročník: 2.

MAPOVANIE OHROZENÝCH OBJEKTOV TRADIČNEJ ARCHITEKTÚRY V KONTEXTE VYUŽITIA CIRKULÁRNEJ EKONOMIKY

MAPPING OF ENDANGERED OBJECTS OF TRADITIONAL ARCHITECTURE IN THE CONTEXT OF THE USE OF THE CIRCULAR ECONOMY

Abstract

Construction and demolition waste represents more than one-third of all waste generated in the European Union, highlighting the need for circular economy principles in the building sector. This paper focuses on the potential of selective demolition and reuse of materials from deteriorated buildings of traditional architecture in the Malé Karpaty region of Slovakia. The study includes mapping endangered vernacular buildings within the Červený Kameň microregion to identify their material composition and potential for reuse. Based on visual and field surveys, a database of endangered structures was created, serving as a foundation for future research on selective demolition strategies and circular design approaches. The results underline the importance of recognizing even non-protected historic buildings as valuable material resources that can contribute to sustainable regional heritage preservation.

Kľúčové slová / Key Words
cirkulárna ekonomika; selektívna demolácia; opätovné využívanie; historické objekty; tradičná architektúra

1. Úvod

Stavebný odpad a odpad z demolácií tvorí v Európskej únii viac ako tretinu celkového vyprodukovaného odpadu, čo vytvára významný tlak na životné prostredie aj skládkové kapacity. [1] V reakcii na to sa princípy cirkulárnej ekonomiky stávajú neoddeliteľnou súčasťou stratégií udržateľného rozvoja. Medzi tieto stratégie sa radí aj selektívna demolácia a nasledovná recyklácia alebo opätovné využívanie stavebných materiálov a prvkov. Kým recyklácia je v praxi už relatívne rozšírená, priame opätovné využívanie predstavuje väčšiu výzvu [2], ale aj vyšší potenciál z hľadiska zachovania architektonického dedičstva.

Viaceré historické objekty sa z dôvodu dlhodobého zanedbania dostávajú do nevyhovujúceho stavu pre ich ďalšie využívanie a stávajú sa tak potenciálnymi adeptami na selektívnu demoláciu a ložiskom zabudovanej energie v podobe stavebného materiálu. Mnohé z týchto objektov nie sú pamiatkovo chránenými budovami, ale napriek tomu nesú kultúrno-historické hodnoty a tvoria charakter svojho prostredia. Postupné vytrácanie takýchto objektov z regiónu, prispieva k strate jeho identity a mení ho na nehomogénne územie bez odkazu na jeho históriu.

Zavádzanie princípov cirkulárnej ekonomiky do architektonickej praxe však nespočíva len v samotnom procese selektívnej demolácie. Dôležité je aj správne a zmysluplné využitie sekundárne získaných materiálov v ďalšom architektonickom navrhovaní. Je to jedna z ciest ako môžu tieto princípy prispieť k zachovávaniu architektonického dedičstva regiónov. Materiálovo-technická základňa pôvodnej tradičnej zástavby spoluvytvára charakter jednotlivých regiónov. Pre každý región

bola typická a jej charakter sa prejavuje najmä pri vernakulárnej architektúre. Tá využívala miestne materiály, ktoré sa stali jedným z výrazových prostriedkov architektúry.

Príspevok sa venuje stručnej teoretickej príprave k problematike mapovania ohrozených objektov tradičnej architektúry vo vybranom malokarpatskom mikroregióne a analýze potenciálu sekundárneho využitia materiálov, z ktorých sú narušené alebo zanikajúce objekty zhotovené.

2. Selektívna demolácia

2.1 Selektívna demolácia v EÚ

Nevyhnutným krokom k opätovnému využívaniu stavebných materiálov je zavedenie selektívnej demolácie namiesto bežnej demolácie. Selektívna demolácia predstavuje systematický a koordinovaný proces demontáže stavebných objektov s cieľom vytriediť a zachovať maximálne možné množstvo materiálov a prvkov pre ich opätovné využitie alebo recykláciu. Na zhodnotenie stavu budovy pred jej demontážou slúži preddemolačný audit, ktorý pomáha identifikovať, ktoré materiály a prvky sú vhodné na ďalšie využitie. Na základe výsledkov z auditu sa následne vypracuje plán demontáže. [3] Hoci selektívna demolácia prináša viaceré výhody v rámci udržateľnosti, jej implementácia naráža na bariéry, medzi ktoré patrí hlavne vyššia časová aj finančná náročnosť. [2]

Európska komisia začala apelovať na zavádzanie princípov cirkulárnej ekonomiky v stavebníctve v roku 2015 publikovaním plánu *"Closing the Loop – An EU Action Plan for the Circular Economy"*. Základné rámce pre nakladanie so stavebným a demolačným odpadom však stanovila už v roku 2008 Smernica o odpadoch (Waste Framework Directive, 2008/98/EC). [2]

V roku 2018 Európska komisia odporučila členským štátom zaviesť povinný preddemolačný audit ako súčasť metodického usmernenia pre riadenie stavebného a demolačného odpadu. [4] Jeho cieľom je identifikovať a lokalizovať nebezpečné látky v objekte, zinventarizovať materiály a komponenty, ktoré môžu byť znovu použité, recyklované alebo inak zhodnotené a zozbierať dáta o množstvách, kvalite a možnom spôsobe využitia materiálov ešte pred samotnou demontážou objektu. [3]

Členské štáty EÚ sú od roku 2020 povinné zabezpečiť, aby minimálne 70 % hmotnosti stavebného a demolačného odpadu, ktorý nie je nebezpečný, bolo zhodnotených alebo recyklovaných. [2]

2.2 Selektívna demolácia v SR

Slovenská novela zákona o odpadoch z roku 2022 zaviedla povinnosť triedenia stavebného odpadu s cieľom zhodnotiť minimálne 70 % odpadu pre stavby so zastavanou plochou nad 300 m². Podľa zákona č. 79/2015 Z. z. o odpadoch (v znení zákona č. 281/2022 Z. z.) sa selektívna demolácia chápe ako „postup, pri ktorom sa určia postupnosti demolačných činností s cieľom umožniť oddelenie a triedenie odstránených stavebných materiálov a stavebných odpadov". [5] Preddemolačný audit v súčasnosti na Slovensku povinný nie je.

Novela zákona rozlišuje 3 kategórie vytriedeného odpadu: 1. Stavebné odpady a odpady z demolácií, ktoré je možné pripraviť na opätovné použitie alebo recyklovať, 2. Odstránené stavebné materiály, ktoré môžu byť využité ako vedľajší produkt a 3. Stavebné odpady a odpady z demolácií obsahujúce nebezpečné látky alebo znečistené nebezpečnými látkami. [5] Z pohľadu architektonického navrhovania sú relevantné najmä materiály z prvej kategórie.

3. Historický kontext tradičnej architektúry v Malokarpatskom regióne

Uplatnenie selektívnej demolácie a vhodného opätovného využitia stavebných materiáloch pri objektoch tradičnej architektúry, môže pomôcť zachrániť zanikajúce štruktúry a zachovať

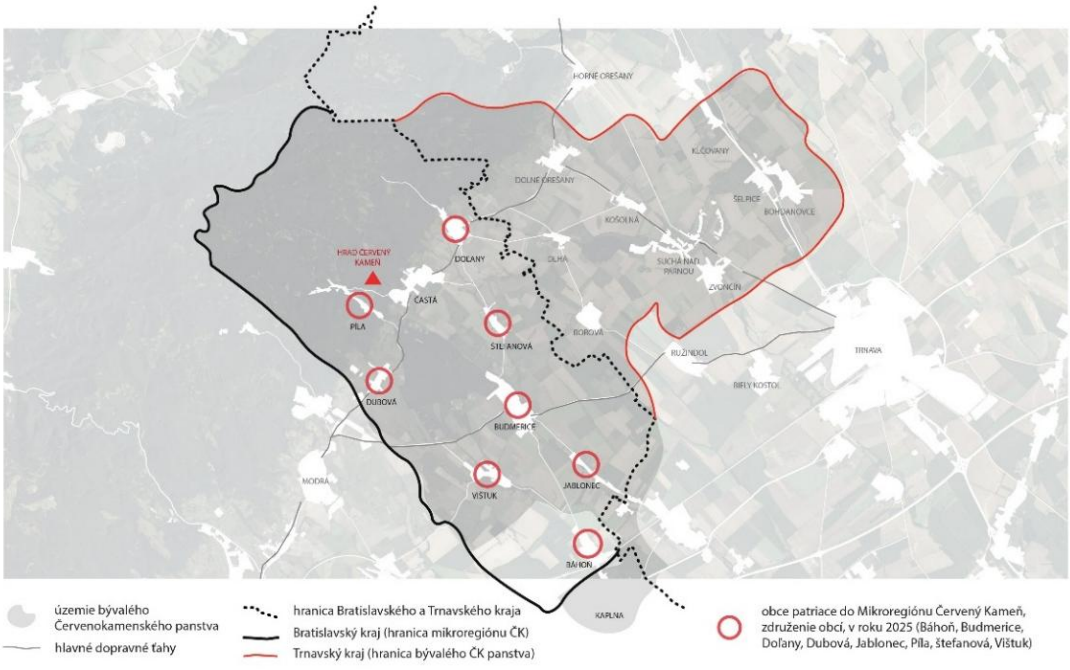
materiálové dedičstvo regiónov. Aby bolo možné tieto princípy cirkulárnej ekonomiky aplikovať efektívne, je nevyhnutné poznať materiálovú základňu regiónu.

Výskum sa zameriava na Malokarpatský región, kde sa dodnes zachovali vidiecke a vinohradnícke stavby, ktorých konštrukčné riešenia vychádzali z lokálne dostupných zdrojov a tradičných remeselných postupov. Postupne však dochádza k úbytku týchto objektov a ich nahrádzaniu novostavbami, ktoré častokrát nerešpektujú pôvodný charakter obcí ani architektonickým, ani materiálovým riešením. Zostávajúce dlhodobo zanedbávané objekty sa pomaly dostávajú do nevyhovujúceho technického stavu a stávajú sa tak potenciálnymi adeptami na selektívnu demoláciu, či už čiastočnú alebo úplnú. Dlhodobá neúdržba a vplyv klimatických podmienok spôsobili tiež postupnú degradáciu materiálov. Strácajú svoje pôvodné stavebno-fyzikálne vlastnosti, čo limituje ich sekundárne využitie. Preto je vhodné pred selektívnou demoláciou realizovať prieskum stavebno-technického stavu, aby sa zabezpečila vyššia kvalita získaných materiálov.

3.1 Vymedzenie skúmaného územia

Mapovanie ohrozených objektov ako potenciál pre selektívnu demoláciu prebieha na území bývalého Červenokameského panstva v Bratislavskom kraji, časti mikroregiónu Červený Kameň, ktorý sa rozprestiera na východnej časti Malých Karpát. Z historického hľadiska do územia tohto panstva patrili aj obce Trnavského kraja, tieto však nie sú predmetom skúmania. Analyzovaný mikroregión zahŕňa obce: Píla, Dubová, Doľany, Štefanová, Budmerice, Vištuk, Báhoň, Jablonec. [6] Mapovanie prebiehalo aj v obci Častá, ktorá bola medzi zakladajúcimi členmi združenia obcí, ale v súčasnosti v ňom nie je.

Mikroregión Červený Kameň bol vybraný aj na základe Memoranda o spolupráci medzi starostami obcí ZO MČK a KARCH SvF STU Bratislava. V rámci tejto spolupráce sa spracováva potenciál vidieckej zástavby v intenciách metodiky Katedry UNESCO pre obnovu architektonického dedičstva, s dôrazom na interdisciplinárnu spoluprácu ako základ kultúrnej udržateľnosti. Cieľom je identifikovať problémy a možnosti obnovy, zachovať identitu regiónu a jeho vidiecky charakter, ako aj monitorovať objekty v nevyhovujúcom stave určené na demoláciu.



Obr. 1: Územie mikroregiónu Červený Kameň [7]

3.2 Materiálovo-technická báza objektov Malokarpatského regiónu

Materiálové zloženie historických objektov v Malokarpatskom regióne bolo priamo ovplyvnené polohou pri pohorí Malé Karpaty a miernym klimatickým pásmom. V 19. storočí je prevládajúcim stavebným materiálom hlina, zatiaľ čo v okolí Bratislavy sa častejšie uplatňoval aj kameň. Ku koncu 19. a na začiatku 20. storočia bola väčšina domov postavená z kameňa alebo pálenej tehly. Menej časté boli objekty z hliny na kamennej podmurovke, ojedinele sa vyskytovali hlinené domy bez podmurovky a drevené stavby tvorili len malý podiel. Na východnej strane Malých Karpát bol výrazný prechod k pálenej tehle až začiatkom 20. storočia. Kameň sa využíval najmä v oblastiach priamo pri pohorí, najčastejšie sa využíval na základy domu alebo pri vinohradníckych pivniciach. Steny boli zvyčajne omietané hlinenou omietkou a bielené vápnom, čo prispievalo k zlepšeniu tepelnej obálky a hygienických podmienok bývania. Stavebné materiály spájala vápenná malta, pripravovaná z lokálne dostupného vápenca z Malých Karpát. [8]

Strešné konštrukcie tvorili drevené krovy. Pri hlinených domoch niesli strechu prístenné drevené stĺpy, ktoré zabezpečovali stabilitu stien. Pevnejšie murivo z kameňa či pálenej tehly už túto oporu nepotrebovalo. Do konca 19. storočia prevažoval valbový typ strechy, ktorý sa počas prvej Československej republiky postupne nahrádzal sedlovým typom. Táto zmena súvisela so zmenou strešnej krytiny. Do konca 18. storočia dominovali krytiny zo slamy a trstiny, ktoré sa následne nahrádzali škridlami z miestnych tehelní alebo dovážanými z Rakúska. Na začiatku 20. storočia už väčšina domov mala škridlovú strechu, zatiaľ čo slama a trstina zostávali druhou najčastejšou alternatívou. Štíty domov sa murovali z pálenej tehly, ojedinele boli na štít použité len dosky. [8]

4. Metodika mapovania ohrozených objektov architektonického dedičstva v mikroregióne Červený Kameň

4.1 Ciele mapovania

Mapovanie ohrozených objektov predstavuje kľúčový krok pri identifikácii potenciálu pre selektívnu demoláciu a opätovné využitie stavebných materiálov v regióne. Ciele mapovania objektov sú: a) vytvorenie inventára ohrozených objektov, ktoré sú potenciálom pre selektívnu demoláciu; b) vytvorenie materiálového potenciálu pre ďalšie využitie v regióne; c) vyhotovenie podkladov a kategorizácia materiálového potenciálu pre ďalšie architektonické navrhovanie.

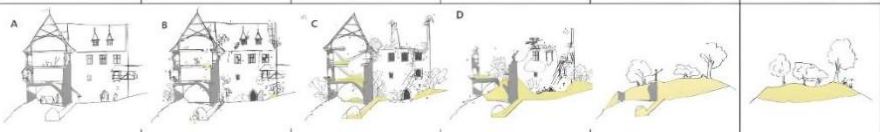
4.2 Výber objektov

Medzi hlavné kritéria výberu objektov daného mapovania patrí vymedzenie lokality na mikroregión Červený Kameň. Tento región slúži ako reprezentant menšieho regiónu v miernom klimatickom pásme, s pomaly miznúcou charakteristickou vidieckou štruktúrou a chýbajúcim aspoň minimálnym stupňom ochrany objektov tradičnej architektúry.

Z hľadiska typu objektu sa jedná o všetky stavby postavené pred rokom 1960, ktoré neboli zásadne prestavané a ich aktuálny stav môžeme označiť za ohrozený. Väčšina objektov na území mikroregiónu sú rodinné domy, pričom podľa posledného sčítania obyvateľov v roku 2021 bol celkový počet skolaudovaných rodinných domov 3977, 1629 objektov bolo postavených do roku 1960 a približne 77% z celkového počtu domov má murovanú konštrukciu (tehly, tvárnice, tehlové bloky). [9]

V mapovaní rozlišujeme objekt narušený alebo objekt v havarijnom stave. Tento systém označovania stavu objektu vychádza najmä z priloženej tabuľky na obrázku 2, ktorá predstavuje fázy postupnej deštrukcie objektu. [10] Mapované boli objekty vo fáze B.-E., pričom objekt vo fáze B je

označovaný ako narušený (objekt so strechou) a objekty vo fáze C.-E. sú označené ako objekty v havarijnom stave (objekt z časti alebo úplne bez strechy).

fázy postupnej deštrukcie od funkčnej stavby až po zánik	A. fáza	B. fáza	C. fáza	D. fáza	E. fáza	F. fáza
stavebno-technický stav	dobrý S-T stav celého objektu	narušený S-T stav celého objektu	havarijný S-T stav celého objektu	havarijný S-T stav častí objektu	dobrý, narušenným havarijný stav častí objektu	dobrý, narušenným havarijný stav častí objektu
grafické zobrazenie*						
miera zachovania/ narušenia**	zachovaný celý objekt s povrchovými úpravami – ako výsledok vrstvenia kultúr	zachovaný celý objekt	zachovaný je základ, nadzemné murivo zachované po korunnú rímsu	zachovaný je základ, identifikovateľné nadzemné murivo (technológia stavania a tektonika otvorov)	zachovaný je základ, neidentifikovateľné nadzemné murivo	zachované sú len odtlačky základového muriva
stratigrafia terénu/ miera zasypania	pôvodný terén – všetky časti objektu prístupné	pôvodný terén – všetky časti objektu prístupné	vznik násypu zo sutín – časti objektu nedostupné kvôli násypom	vysoká miera násypu, min. 50 % muriv pod násypom sutín	násyp , vegetačný kryt prekrývajú ruinu na 100 % – murivá dostupné odkopaním	násyp , vegetačný kryt prekrývajú ruinu na 100 % – murivá sú hlboko pod terénom

Obr. 2: Ilustrácia procesu ruinácie [10]

Vzhľadom na definované etapy narušenia objektu je potrebné určiť, v ktorej fáze možno zabezpečiť vyššiu kvalitu materiálu z objektu určeného na čiastočnú alebo úplnú demoláciu. Ak by sme uvažovali, že vo fáze B (kedy má objekt zachovanú strechu, a nepredpokladá sa výraznejší havarijný stav nosných konštrukcií) je stavebno-fyzikálny stav materiálu ešte vyhovujúci, možno očakávať, že si zachoval pôvodné vlastnosti a sú vhodné na opätovné použitie v nových konštrukciách bez výraznejších limitov. Naopak, ak uvažujeme, že vo fáze C- E je miera narušenia materiálu vyššia (objekt bez strechy je výrazne degradovaný klimatickými vplyvmi) je zrejmé, že stavebno-fyzikálne vlastnosti materiálov budú výrazne horšie. Ich sekundárne využitie bude preto limitované mierou ich narušenia.

Na základe tohto predpokladu sme pri terénnom prieskume v prvej etape zvolili len predbežný prieskum stavebno-technického stavu všetkých objektov vybraných obcí. Monitorované ohrozené objekty boli vybrané na základe vizuálneho posúdenia stavebno-technického stavu prevažne uličnej fasády. Za narušené boli považované viditeľne zanedbané objekty, ktorých strecha bola stále prítomná, ale fasáda vykazovala lokálne poškodenia a praskliny.

Predbežná identifikácia narušených a havarijných objektov predstavuje základ pre plánovanie obnovy vidieckeho sídla. Umožňuje určiť rozsah ohrozených objektov, nastaviť logistiku selektívnej demolácie a identifikovať zdroje opätovne využiteľných materiálov.

4.3 Postup mapovania

Výber ohrozených objektov bol vytvorený kombináciou terénneho prieskumu a diaľkového prieskumu prostredníctvom služby Google Street View. Pomocou Google Street View bolo overované aj dlhodobé zanedbanie objektov porovnávaním dostupných obrazových dát z roku 2012 až 2025. Počas prieskumu boli na základe vizuálnej analýzy zaznamenané nasledujúce informácie: typ objektu (obytný dom, technická stavba, hospodárska stavba a pod.), GPS súradnice, stavebný materiál, miera poškodenia podľa predpokladaného scenára (narušený objekt alebo objekt v havarijnom stave). Každý objekt bol zdokumentovaný fotograficky a pomocou GPS súradníc lokalizovaný do digitálnej mapy.

Zozbierané dáta boli spracované do tabuľky. Príklad záznamu mapovania je uvedený na dvoch objektoch v obci Častá, prezentovaný je na tabuľke 1. a obrázkoch 3. a 4.

Obr. 3: Ruina mlyna (objekt v havarijnom stave) v obci Častá, v tab.1 zapísaný pod ID 1 [11]

Obr.4: Narušený objekt v obci Častá, v tab.1 zapísaný pod ID 2 [11]

Tab. 1: Mapovanie objektov (časť tabuľky)

ID	Objekt	Obec	GPS údaje	Typ stavby	Materiál dominantný	Materiál doplnkový	Stav objektu
1	Mlyn Brunovského	Častá	48°23'07.0"N 17°20'37.9"E	technická	kameň, tehla	drevo	havarijný
2	Dom na Hlavnej	Častá	48°23'43.1"N 17°21'16.6"E	obytná	tehla, kameň	drevo, škridla	narušený

4.4 Výsledky mapovania

Výsledkom vizuálnej etapy prieskumu je digitálna mapa ohrozených objektov tradičnej architektúry v mikroregióne Červený Kameň. Zároveň bola databáza objektov spracovaná do tabuľky (ukážka v tab. 1) obsahujúcej základné informácie o type stavby a jej technickom stave. Vyhotovená bola tiež fotodokumentácia objektov.

Mapovaním bolo v rámci riešeného územia doposiaľ identifikovaných ako ohrozených 20 objektov, z toho 3 v havarijnom stave, ostatné boli predbežne označené ako narušené. Najviac narušených objektov bolo identifikovaných v obci Doľany. Väčšina objektov sú rodinné domy, v zozname ale nájdeme aj objekt mlyna alebo fary. Na základe teoretického a vizuálneho prieskumu je dominantným stavebným materiálom tehla.

Databáza vytvorená mapovaním môže vytvoriť základný podklad pre:

- analýzu materiálového a technického zloženia objektov
- návrh selektívnej demolácie a posúdenie potenciálu sekundárneho využitia materiálov in situ alebo v rámci regiónu
- návrh regionálnych opatrení a stratégii obnovy a ochrany vybranej vzorky vidieckych sídel malokarpatského regiónu v súlade s princípmi cirkulárnej ekonomiky

Výsledky mapovania predstavujú čiastkovú etapu výskumu, ktorý bude ďalej pokračovať podrobnejším terénnym prieskum a priebežným dopĺňaním údajov o jednotlivých objektoch. Hodnotenie technického stavu na základe vizuálneho prieskumu je iba orientačné, a preto výslednú vzorku narušených objektov nemožno považovať za definitívnu. Ide skôr o orientačný údaj pre ďalší výskum v teréne.

5. Záver

Príspevok poukazuje na potrebu prípravy pre uplatnenie princípov obehového hospodárstva v oblasti ochrany a obnovy tradičnej architektúry regiónov. Mapovanie ohrozených objektov predstavuje prvý krok k vytvoreniu databázy materiálového dedičstva, ktorá môže slúžiť ako podklad pre proces selektívnej demolácie a opätovného využitia stavebných materiálov a prvkov.

Cieľom príspevku je zároveň poukázať na to, že aj menšie a pamiatkovo nechránené historické objekty často tvoria materiálový potenciál, ktorý by mohol byť využitý v rámci regionálnych stratégií obnovy a ochrany sídel. Keďže súčasná legislatíva nezahŕňa povinnosť selektívnej demolácie pri objektoch so zastavanou plochou menšou ako 300 m^2, vo viacerých prípadoch sa tento potenciál stráca. Dôležitejšie ako zavádzanie legislatívnych opatrení môže byť vzdelávanie a osveta medzi majiteľmi objektov tradičnej architektúry v oblasti zodpovedného prístupu pri likvidácii a následného sekundárneho využitia pôvodných materiálov. Úlohu v tom môže zohrávať iniciatíva obcí a regiónov formou pilotných projektov, školení či metodík. Takýto prístup môže zabezpečiť, že selektívna demolácia nebude len technickým procesom znižovania množstva odpadu, ale aj nástrojom zachovania pamäti miesta a regionálnej identity prostredníctvom vedomého a citlivého sekundárneho využívania materiálov.

Príspevok vytvára základ pre ďalšie štúdium ochrany architektonického dedičstva v kontexte princípov cirkulárnej ekonomiky.

Literatúra

[1] *Buildings and construction*. Online. European Commission. Dostupné z: https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/buildings-and-construction_en. [cit. 2025-11-02].

[2] CONDOTTA, Massimiliano a ZATTA, Elisa. Reuse of building elements in the architectural practice and the European regulatory context: Inconsistencies and possible improvements. Online. *Journal of Cleaner Production*. 2021. ISSN 0959-6526. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128413. [cit. 2025-10-30].

[3] Guidelines for the waste audits before demolition and renovation works of buildings. Online. European Commission. 2018. Dostupné z: https://ec.europa.eu/docsroom/documents/31521/. [cit. 2025-11-02].

[4] Európska komisia. EU Construction and Demolition Waste Protocol. Online. Dostupné z: https://single-market-economy.ec.europa.eu/news/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-2018-09-18_en. [cit. 2025-10-30].

[5] Národná rada Slovenskej republiky. Zákon č. 79/2015 Z. z. o odpadoch a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení zákona č. 281/2022 Z. z. Online. Dostupné z: https://www.nrsr.sk/web/Default.aspx?sid=zakony/zakon&MasterID=8675. [cit. 2025-11-03]

[6] *História založenia a fungovanie združenia*. Online. Mikroregión Červený Kameň. 2024-06-04. Dostupné z: https://www.mck.sk/24476/historia-zalozenia-a-fungovanie-zdruzenia. [cit. 2025-11-03].

[7] Autor obrázku Martina Kalivodová

[8] GAZDÍKOVÁ, Alžbeta. Záhorie, Malokarpatská a Trnavská oblasť. In: *Ľudová architektúra a urbanizmus vidieckych sídiel na Slovensku*. Bratislava: Academic Electronic Press, 1998, s. 29-66. ISBN 80-88880-23-8.

[9] Domy – Základné výsledky. Online. Štatistický úrad Slovenskej republiky. 2021. Dostupné z: https://www.scitanie.sk/domy/zakladne-vysledky/pocet-domov/SR/SK0/SR [cit. 2025-11-03]

[10] POLIAK, Martin. Zaťaženie pamiatok deštrukčnými činiteľmi a mechanizmami. In: GREGOROVÁ, Jana a kol. *OCHRANA A OBNOVA ARCHITEKTONICKÉHO DEDIČSTVA*. Bratislava: Spektrum, 2023, s. 189-190. ISBN 978-80-227-5379-1.

[11] Fotoarchív autorky príspevku

Nancy Sedláčková [1]
Study program: Theory and Structures of Buildings, IV. year

Mycelium-Based Biocomposites as Eco-Friendly Thermal Insulation: Sorption and Thermal Properties

Abstract

This study investigates mycelium-based biocomposites as a sustainable alternative to conventional synthetic thermal insulation materials. Thermal conductivity and sorption behavior were evaluated for four biocomposite variants prepared from different plant substrates. Thermal conductivity ranged from 0.0494 to 0.0621 W/(m·K), demonstrating competitive insulating performance. The results highlight the influence of substrate type on material properties and indicate that mycelium-based biocomposites offer favorable thermal and hygroscopic characteristics. These findings support their potential use in sustainable building insulation, with further research needed on long-term moisture resistance, mechanical strength, and production optimization.

Key words
sustainability; thermal conductivity; thermal insulation; biocomposite, humidity, sorption

1. Úvod

In the current era, where increasing emphasis is placed on sustainability and environmentally friendly construction materials, biocomposites are gaining growing attention. One of the key aspects in evaluating thermal insulation materials is their behavior under humid conditions. Moisture significantly affects the thermal conductivity of materials — as the moisture content increases, their insulating performance decreases, resulting in higher heat losses. Moreover, excessive moisture can adversely influence the structural integrity and durability of materials, which is particularly important for materials of natural origin, such as mycelium and sunflower stalks.

To better understand the behavior of such materials in humid environments, sorption isotherms are commonly used [1]. These curves describe the relationship between the equilibrium moisture content of a material and the relative humidity of the surrounding environment. Sorption isotherms make it possible to determine how much moisture a material absorbs or releases under various conditions, which is crucial for the design of insulation layers and the assessment of their long-term stability.

Sorption isotherms provide a graphical representation of the relationship between the equilibrium moisture content in the material and the relative humidity of the surrounding air at a constant temperature. These curves are essential for understanding how a material behaves under different humidity levels — specifically, how much water vapor it can absorb or release under varying ambient humidity [2]. Knowledge of sorption characteristics is vital for assessing a material's suitability for insulation purposes, particularly in terms of its ability to regulate indoor microclimate, to accumulate moisture without loss of functional properties, and to prevent biological degradation such as mold growth or decay [3].

[1] Nancy, Sedláčková, Ing.

In the experimental part of this study, the sorption properties of several mycelium-based biocomposite samples with different compositions and structures will be investigated and compared with the base materials of the composite and with commercial thermal insulation products. The experiment aims to compare their moisture absorption capacities at different relative humidity levels and to identify differences in behavior during adsorption and desorption processes. The objective of this study is to determine how the type of plant substrate used in the mycelium-based biocomposite affects its sorption behavior and moisture-binding capacity.

Growing awareness of the environmental impacts of synthetic construction materials has intensified interest in sustainable and eco-friendly alternatives. Thermal insulation is a key component of building envelopes, significantly contributing to energy efficiency by reducing operational energy consumption.

Biocomposites, composed of natural fibers and bio-based binders, are emerging as promising substitutes for conventional synthetic insulation materials [4]. Traditional natural insulators such as hemp, sheep wool, straw, and corn have long been used; however, modern applications demand compliance with stricter performance standards related to thermal conductivity, moisture resistance, mechanical strength, and fire safety. The selection of appropriate natural constituents is therefore critical to achieving the desired balance of properties.

Mycelium—the vegetative network of fungal hyphae—represents a particularly interesting and sustainable component. It forms a porous fibrous structure composed of hyphae with diameters ranging from 1 to 30 μm and lengths extending up to several meters [5]. Through enzymatic decomposition of organic matter, mycelium can colonize agricultural residues and form cohesive biocomposites. This characteristic makes it an attractive material for producing natural, biodegradable insulation [6].

Mycelium-based composites are lightweight, porous, and environmentally benign. Their production requires minimal energy input and can utilize agricultural by-products, supporting circular economy principles. Beyond construction, such materials are increasingly explored for use in packaging, product design, and as biodegradable plastic alternatives.

The objective of this study is to develop a fully natural, recyclable, and biodegradable thermal insulation material that can be safely reintegrated into the environment after use. The research focuses on the initial testing of mycelium-based samples, emphasizing structural integrity, bonding behavior, and growth characteristics. It is anticipated that the resulting materials will exhibit a microstructure comparable to synthetic foams such as polystyrene, with similar thermal conductivity values. By optimizing the combination of natural substrates, an efficient and sustainable biocomposite insulation is expected to be achieved.

2. Materials and methods

2.1 Materials

Four mycelium-based bio-composite samples were prepared using different parts of the plant as substrates in order to assess how substrate composition affects thermal insulation performance. The samples were created through the inoculation of mycelium into a nutrient-rich agricultural waste substrate, followed by controlled growth, moulding, and drying processes. Thermal conductivity of each sample was measured using an Isomet 2114 device under controlled temperature and relative humidity conditions. Measurements were performed with a surface probe placed on the material surface, ensuring sufficient sample thickness for accurate readings. The obtained thermal conductivity values for all tested samples are summarized in Table 1.

Table 1: Thermal properties of measured bio-composites

Material	Thermal conductivity λ (W/(m·K))	Volumetric heat capacity c (J/(m^3·K) · 10^{-6})
Sunflower pith composite	0,0621	0,1532
Sunflower stem composite	0,0494	0,105
Sunflower mix composite	0,0564	0,1796
Sunflower heads composite	0,0573	0,1668

In this experiment, three selected samples from four mycelium-based bio-composite materials (see Fig. 2) were tested under different levels of relative humidity. Each sample was gradually exposed to controlled humidity conditions, and changes in mass were recorded over time. The collected data were used to determine the equilibrium moisture content of the materials at specific points of sorption and desorption, which served as the basis for constructing the corresponding sorption and desorption curves.

Figure 1: Mycelium-based bio-composite samples

In accordance with STN EN ISO 12571:2013, which specifies the procedure for determining the hygroscopic sorption properties of thermal insulation materials, representative samples were selected to reflect the heterogeneity of the tested materials. Although the standard recommends sample dimensions of at least 100 × 100 mm for lightweight materials with a density below 300 kg/m³, smaller specimens (50 × 50 mm) were used in this study due to the limited capacity of the climatic chamber and to accelerate the attainment of equilibrium moisture content.

The experiment included various materials. The primary group consisted of mycelium-based bio-composite samples, prepared in triplicate for each variant. In addition, reference materials commonly used in thermal insulation—such as wood fiber insulation, expanded polystyrene (EPS), and polyisocyanurate (PIR) boards—were tested to enable comparison with standard commercial products and data available in the literature.

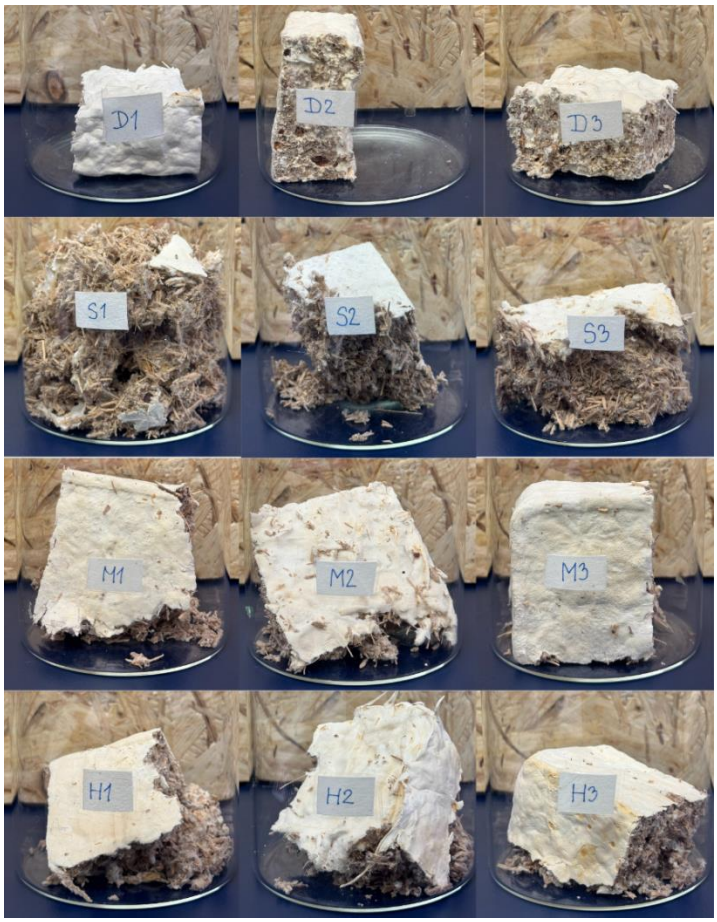


Figure 2: Prepared test specimens of mycelium-based bio-composite samples

3. Results

Sorption and desorption curves are typically constructed from measurements obtained at several levels of relative humidity—commonly at 50%, 65%, 80%, and 95%—to accurately capture the material's moisture absorption and release behavior. In this study, however, due to a temporary technical malfunction of the measurement equipment, data could be collected only at selected humidity levels. Available data included the initial dry mass of the samples and their masses after exposure to controlled conditions at 50% and 88% relative humidity.

Although the number of measurement points was limited, the obtained results provide a meaningful preliminary indication of the sorption behavior of the mycelium-based bio-composite, particularly within the medium to high humidity range.

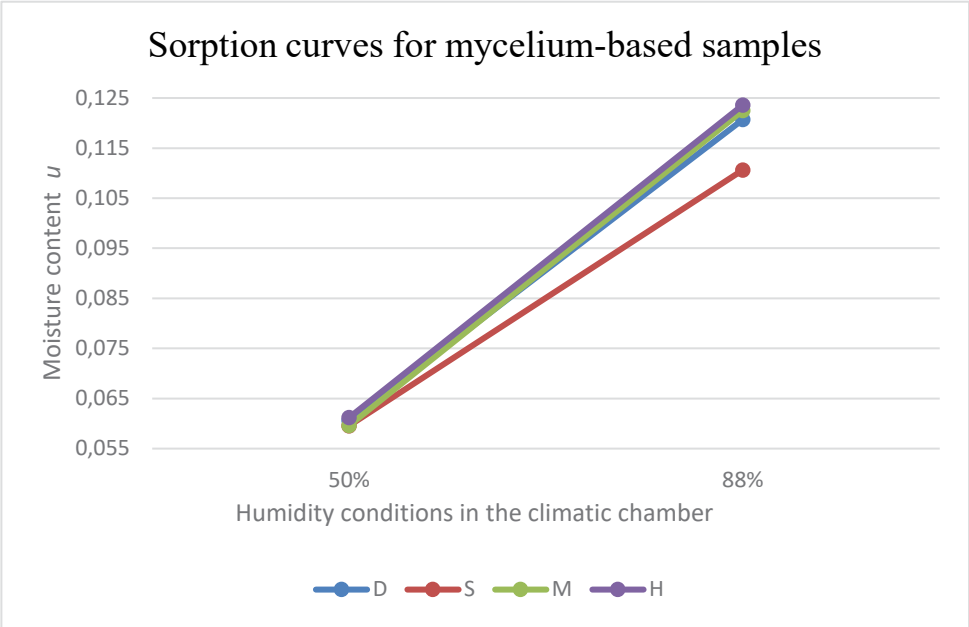


Figure 3: Sorption of mycelium based specimens

Figure 3 presents the sorption curves of four mycelium-based bio-composite samples tested at two levels of relative humidity (50% and 88%) in a climatic chamber. The samples represent different parts of the plant substrate: D – pith, S – stem, M – mixed fraction, and H – head. Figure 4 illustrates the sorption behavior of the reference materials, including conventional and alternative insulation products.

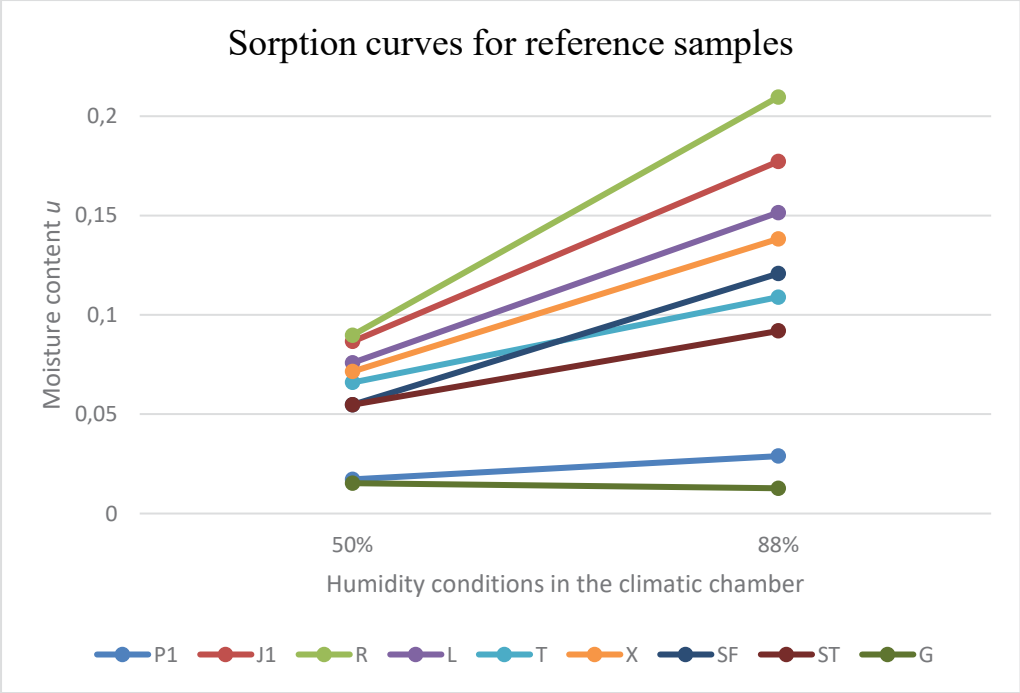


Figure 4: Sorption of reference specimens

To compare the sorption properties of mycelium-containing bio-composites with those of the base materials and commercial insulation products, moisture absorption was analyzed under varying humidity conditions. All materials exhibited a generally increasing moisture content with rising relative humidity. A more pronounced difference was observed in the pith samples, where the bio-composite colonized by mycelium (sample R) showed an increase in moisture content from approximately 0.08 to 0.22, while the untreated pith exhibited only a moderate increase from 0.06 to 0.12. This indicates a significantly higher sorption capacity in the mycelium-colonized material compared to the raw substrate.

For validation, the results were compared with data from a previous study on wood fiber insulation (Steico Flex), which reported equilibrium moisture contents ranging from 0.07 to 0.13 depending on relative humidity. The values measured in this study (0.06–0.13) show strong agreement, confirming the reliability and consistency of the experimental results [7].

All samples, except for G (Greywall – expanded polystyrene) and P1 (PIR – polyisocyanurate insulation), showed a clear increase in moisture content with higher relative humidity. This behavior reflects the hydrophobic nature of PIR and polystyrene, which exhibit negligible sorption capacity and do not absorb moisture from the surrounding environment.

Overall, these results highlight the contrast between the hygroscopic behavior of natural bio-composites and the moisture resistance of synthetic insulations. While mycelium-based bio-composites absorb more moisture, their sorption capacity may contribute to improved indoor microclimate regulation and long-term hygrothermal stability in building applications.

4. Conclusion

The aim of this study was to investigate the sorption properties and thermal conductivity of mycelium-based bio-composite materials as a potential ecological alternative to conventional synthetic insulation. The experimental results demonstrated that the tested materials actively respond to changes in ambient humidity, with individual samples exhibiting distinct behavior depending on the type of plant substrate used.

Measured thermal conductivity values ranged from 0.0494 to 0.0621 W/(m·K), indicating good insulating performance compared to conventional materials. The lowest thermal conductivity was observed in the sample prepared from stem material, while the highest value corresponded to the sample made from the pith fraction. This variability highlights the significant influence of raw material selection and processing on the final properties of the bio-composite.

Despite technical limitations during the sorption measurements (incomplete data from the climatic chamber), valuable information was obtained regarding the material's ability to absorb moisture under high relative humidity. These findings are essential for evaluating the long-term stability, durability, and resistance of the material to biological degradation under real environmental conditions.

Overall, mycelium-based bio-composites show strong potential as sustainable construction materials. Their production is energy-efficient, relies on renewable and waste resources, and provides favorable thermal and sorption characteristics. Further research should focus on long-term moisture resistance, mechanical strength, and optimization of the manufacturing process to enable broader practical application in building insulation systems.

Acknowledgements

This article was supported in the framework of the project: Program for motivation and support of increasing the quality and efficiency of the scientific research activity of young scientific research workers 2024, with the number 1638.

References

[1] Z. (Joey) Yang, F. Zhang, B. Still, M. White, and P. Amstislavski, "Physical and Mechanical Properties of Fungal Mycelium-Based Biofoam," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 7, Jul. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001866.

[2] M. Charai, H. Sghiouri, A. Mezrhab, and M. Karkri, "Thermal insulation potential of non-industrial hemp (Moroccan cannabis sativa L.) fibers for green plaster-based building materials," *J Clean Prod*, vol. 292, p. 126064, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.126064.

[3] "Tekuté Mycélium - SvetHub.sk." Accessed: Apr. 15, 2025. [Online]. Available: https://www.svethub.sk/tekute-mycelium/

[4] M. L. Smith, J. N. Bruhn, and J. B. Anderson, "The fungus Armillaria bulbosa is among the largest and oldest living organisms," *Nature*, vol. 356, no. 6368, pp. 428–431, 1992, doi: 10.1038/356428A0.

[5] M. R. Islam, G. Tudryn, R. Bucinell, L. Schadler, and R. C. Picu, "Morphology and mechanics of fungal mycelium," *Sci Rep*, vol. 7, no. 1, Dec. 2017, doi: 10.1038/S41598-017-13295-2.

[6] A. Mohseni, F. R. Vieira, J. A. Pecchia, and B. Gürsoy, "Three-Dimensional Printing of Living Mycelium-Based Composites: Material Compositions, Workflows, and Ways to Mitigate Contamination," *Biomimetics*, vol. 8, no. 2, p. 257, Jun. 2023, doi: 10.3390/BIOMIMETICS8020257.

[7] Hellová E. Katarína, "Autoreferát dizertačnej práce Modelovanie transportu vlhkosti a tepla pórovitými stavebnými materiálmi na získanie: vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor."

***Ing. Michal Šveda*[1]**
Študijný program: Teória konštrukcií pozemných stavieb, III. ročník

VPLYV KLIMATICKÝCH PODMIENOK NA TEPLOTU A PRÚDENIE VZDUCHU V MEDZIPRIESTORE DVOJITEJ TRANSPARENTNEJ FASÁDY

IMPACT OF CLIMATIC CONDITIONS ON THERMAL AND FLOW CONDITIONS IN THE INTERSTITIAL CAVITY OF A DOUBLE-SKIN TRANSPARENT FACADE

Abstrakt

V zime sa medzipriestor dvojitej transparentnej fasády správa ako nízkopotenciálny zdroj tepla, ktorý vzniká kombináciou slnečného žiarenia a akumulácie tepla v obálke. Tento príspevok poukazuje na možnosti využitia potenciálu na podporu tepelného čerpadla vzduch–voda. Analyzujú sa tri charakteristické zimné dni (jasný, veterný, zamračený) s minútovým rozlíšením meraní. Paralelne sa sledujú globálne horizontálne žiarenie, vonkajšiu teplotu, teplotný rozdiel medzi medzipriestorom a exteriérom a rýchlosť prúdenia po výške fasády a tieto údaje sa prepájajú s prevádzkovými záznamami vonkajšej jednotky tepelného čerpadla. Po zjednotení časovej základne sa vyhodnocujú denné energetické ukazovatele a koeficient účinnosti vzťahovaný na vonkajšiu jednotku tepelného čerpadla, skúma sa vzťah $\Delta T = f(GHI)$, opisuje sa vertikálny profil prúdenia a diskutuje sa vplyv vetra a odmrazovania. Výsledkom je zhodnotenie fyzikálnych vlastností medzipriestoru v zimnom období (teplotný rozdiel, prúdenie, súvis s globálnym žiarením) a kvantifikované okrajové podmienky pre CFD, spolu so stručným metodickým postupom použiteľným pre podobné fasády.

Abstract
In winter, the interstitial cavity of a double-skin transparent façade can act as a low-grade heat source created by solar gains and thermal storage in the envelope. We show how this potential can support the operation of an air-source heat pump. We analyse three characteristic winter days (clear, windy, overcast) at one-minute resolution, monitoring global horizontal irradiance, outdoor air temperature, the cavity–outdoor temperature difference and vertical airflow along the façade, and relating these to operating records of the outdoor unit. After unifying the time base we derive daily energy indicators and a coefficient of performance referenced to the outdoor unit, examine the relation $\Delta T = f(GHI)$, describe the vertical airflow profile, and discuss the roles of wind and defrost. The result is an evaluation of the physical properties of the interstitial space in winter (temperature difference, flow, connection with global radiation) and quantified boundary conditions for CFD, together with a brief methodological procedure applicable to similar facades.

Kľúčové slová
dvojitá transparentná fasáda; medzipriestor; GHI; ΔT; rýchlosť prúdenia; COP (Coefficient of Performance)

1 ÚVOD

Z meraní bolo potvrdené, že medzipriestor dvojitej transparentnej fasády (DTF) dosahuje vyššie teploty vzduchu v zimnom období v porovnaní s exteriérom. Funguje tu fyzikálny jav transformácie

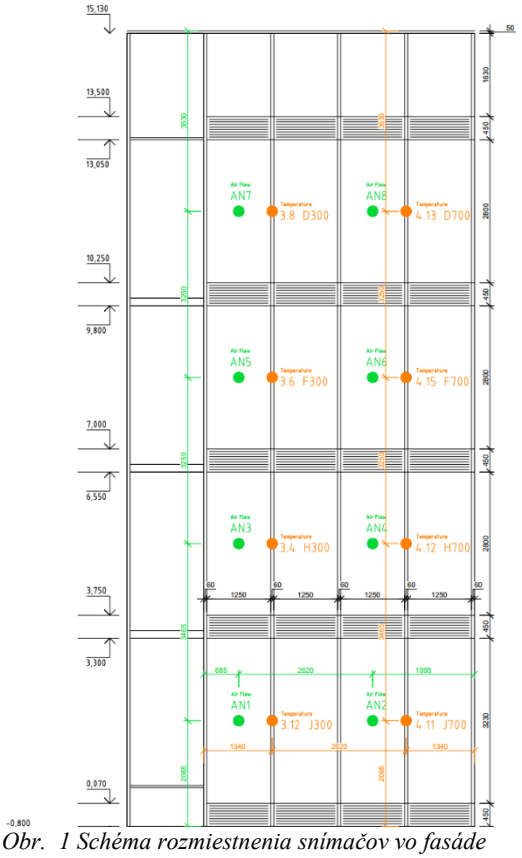
krátkovlnného slnečného žiarenia cez zasklenie a jeho absorpcie v medzipriestore fasády s následnou emisiou dlhovlnného tepelného žiarenia – tzv. skleníkový efekt. Zimné zvýšenie teploty v medzipriestore a potenciál pre predohrev privádzaného vzduchu dokumentujú prípadové štúdie a experimenty (Bielek & Klem, 2020; IEA SHC/ECBCS, 2007; Araji et al., 2024).
Vzduch v medzipriestore tak predstavuje nízkopotenciálny zdroj tepla, ktorý možno využiť na predhrievanie privádzaného vzduchu alebo na podporu tepelných zdrojov budovy. V praxi sa využitie často obmedzuje na lokálne rekuperačné jednotky, zatiaľ čo priame napojenie na centrálne zdroje a adaptívne riadenie privádzaného vzduchu je menej bežné (IEA SHC/ECBCS, 2007).
Súbežne sa v modernej výstavbe rozširuje nasadzovanie tepelných čerpadiel vzduch–voda (TČ) na vykurovanie a prípravu TV. Ich účinnosť v zime klesá s poklesom vonkajšej teploty a počas odmrazovacích cyklov (Marsik et al., 2023; Nawaz et al., 2021), čo vedie k potrebe bivalentného dohrevného zdroja v špičkách (ASHRAE IC 62.1-2007-21). Preto dáva zmysel skúmať, do akej miery možno nízko potenciálne teplo z medzipriestoru DTF využiť v prospech prevádzky TČ a obmedziť deficity účinnosti v kritických intervaloch.
V zime 2024/2025 sme preto realizovali experiment s hustým časovým rozlíšením (1 min), v ktorom sme paralelne merali globálne horizontálne žiarenie (*GHI*), vonkajšiu teplotu, teplotné rozdiely a rýchlosti prúdenia v medzipriestore a prevádzkové veličiny tepelného čerpadla (elektrický príkon vonkajšej jednotky a dodané teplo).
Cieľom tejto štúdie je:

- kvantifikovať ΔT a rýchlosti v medzipriestore pre tri charakteristické zimné dni,
- ilustrovať dennú energetickú bilanciu a čiastočný COP definovaný ako pomer denného dodaného tepla k dennej spotrebe elektriny vonkajšej jednotky,
- pripraviť číselné okrajové podmienky pre CFD analýzy a návrh riadenia prieduchov.

2 METODOLOGIA

2.1 Technicom – Lokalita a snímače

Dvojitá transparentná fasáda je navrhnutá ako šachtová s priechodným medzipriestorom šírky 580 mm, priebežným po celej výške budovy (4 podlažia). Základný modul fasády tvorí 1310 × 2800 mm + 450 mm prívodná/odvodná žalúzia; na 1. NP s väčšou svetlou výškou je modul 1310 × 3230 mm + 450 mm. Celkový rozmer adaptívnej fasády je 5270 × 15510 mm (≈ 81.74 m^2). Fasáda má variabilnú účinnú výšku prevetrávanej medzery 3680 mm (1. NP) až po 15060 mm (vývod výduchu cez atiku na strechu) (Katunský et al., 2018).
Teplotné snímače - teplota v medzipriestore je zaznamenávaná meracou ústredňou ALMEMO s termo-káblami, presnosť ±0.35 *K*.
Na záznam rýchlosti prúdenia vzduchu boli použité odporové anemometre EE576 (pre citlivé merania), presnosť ±0.05 m/s + 2 % z hodnoty pre rozsah 0.2–1 *m/s*. Vo fasáde je 8 teplotných snímačov (2 ks pre každé podlažie), 2 snímače pred tepelným čerpadlom a 1 snímač za tepelným čerpadlom. Snímače prúdenia vzduchu sú zhodne umiestnené vedľa teplotných



Obr. 1 Schéma rozmiestnenia snímačov vo fasáde

snímačov vo fasáde; ďalší snímač prúdenia je osadený vo výfukovom potrubí za TČ v ustálenej vzdialenosti.
Schéma osadenia snímačov. Presná poloha snímačov je zrejmá z obrázka Obr. 1 – Schéma osadenia snímačov teploty a prúdenia v medzipriestore.

2.2 Spracovanie dát

Všetky surové dáta sme zjednotili podľa spoločného časového kroku – 1 min. Doplnili sme chýbajúce minúty, odstránili duplicity a zjednotili jednotky. Rýchlosti sme vyhladili kĺzavým priemerom: 10 minút pre úrovne L1–L4 a pre snímač AN9.
Ako hlavnú teplotnú veličinu sa používa ΔT_grad, teda vypočítaný teplotný gradient - vzostup teploty medzi prvým podlažím (L1) a posledným podlažím (L4) v medzipriestore. Rýchlosti v_L1…v_L4_med predstavujú mediány rýchlostí podľa výškových úrovní po aplikácii kĺzavého priemeru (10 min). Snímač AN9 meria rýchlosť vzduchu vo výfukovom potrubí za vonkajšou jednotkou TČ (MA 10 min).
Z kumulatívnych počítadiel dodaného tepla (Q_th_kWh_cum) a odberu elektriny vonkajšej jednotky (E_out_kWh_cum) sme určovali hodinové prírastky ako rozdiel maxima a minima v rámci hodiny; pritom sme filtrovali neplatné nulové skoky. Denné energie vznikli ako rozdiel denného maxima a minima; priebežne sme kontrolovali ich súlad so súčtom hodinových prírastkov. Na minútových grafoch sme hodinové hodnoty tepla priradili ku všetkým minútam príslušnej hodiny pomocou pomocného kľúča HourKey.
COP je definovaný ako Q_th_day / E_out_day (vypočítané len pre vonkajšiu jednotku). Podiel času aktívnej prevádzky za deň sa vyjadrujú v percentách.
Na porovnanie GHI–ΔT sme vytvorili príznak denného svetla (Daylight) a triedy žiarenia po 25 W/m² (Bin25). Dáta sme následne spracovali kontingenčnou tabuľkou a zobrazili v bodovom grafe (XY) s lineárnou regresiou a koeficientom determinácie R^2 (Obr. 5).

2.3 Výber dní

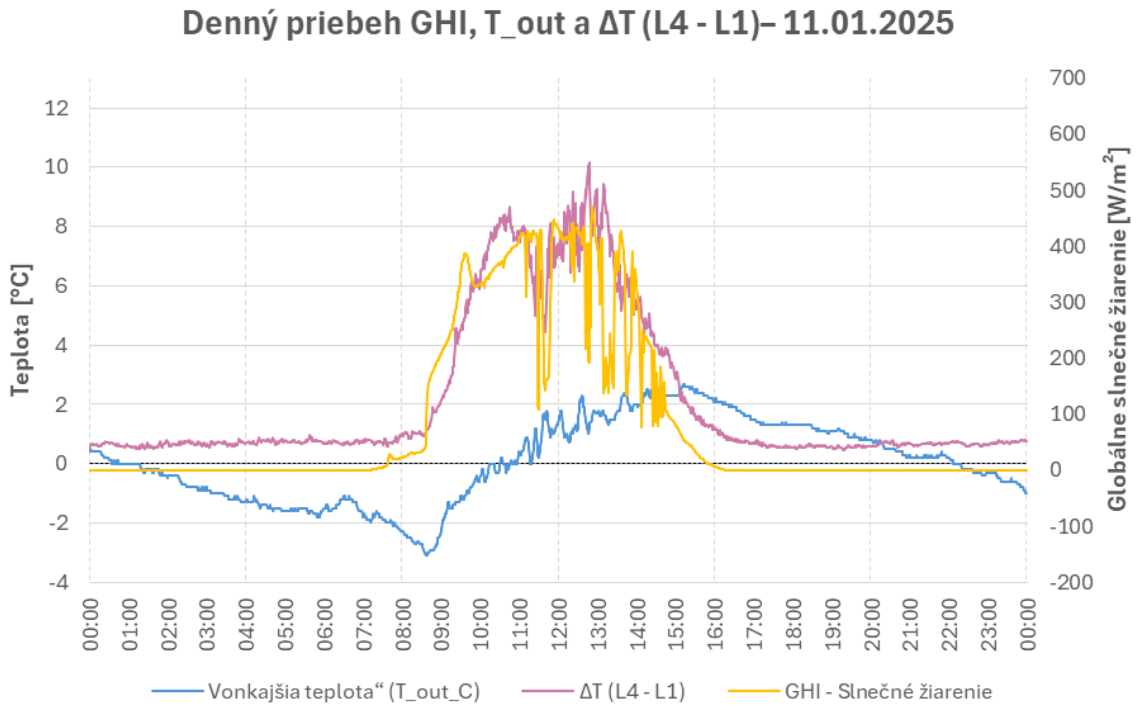
Dni boli vybrané cielene tak, aby reprezentovali tri charakteristické dni v zimnom období s kompletnými záznamami zo všetkých meraní (žiarenie, teplota, prúdenie, energetika tepelného čerpadla). Uprednostnili sme obdobie so stabilnou prevádzkou a bez anomálií (poruchy, zrážky) a s podobným rozsahom vonkajšej teploty. Z druhého januárového týždňa 2025 sme zvolili: jasný deň (silné slnečné žiarenie a predpokladaný vzťah GHI–ΔT), veterný deň (vyššia dynamika prúdenia a zreteľné odmrazovanie tepelného čerpadla) a zamračený deň (nízke žiarenie a potlačené ΔT). Takto zostavená trojica nám umožňuje porovnať vplyv žiarenia a vetra na teplotné a prietokové pomery a na prevádzku tepelného čerpadla v krátkom časovom okne.

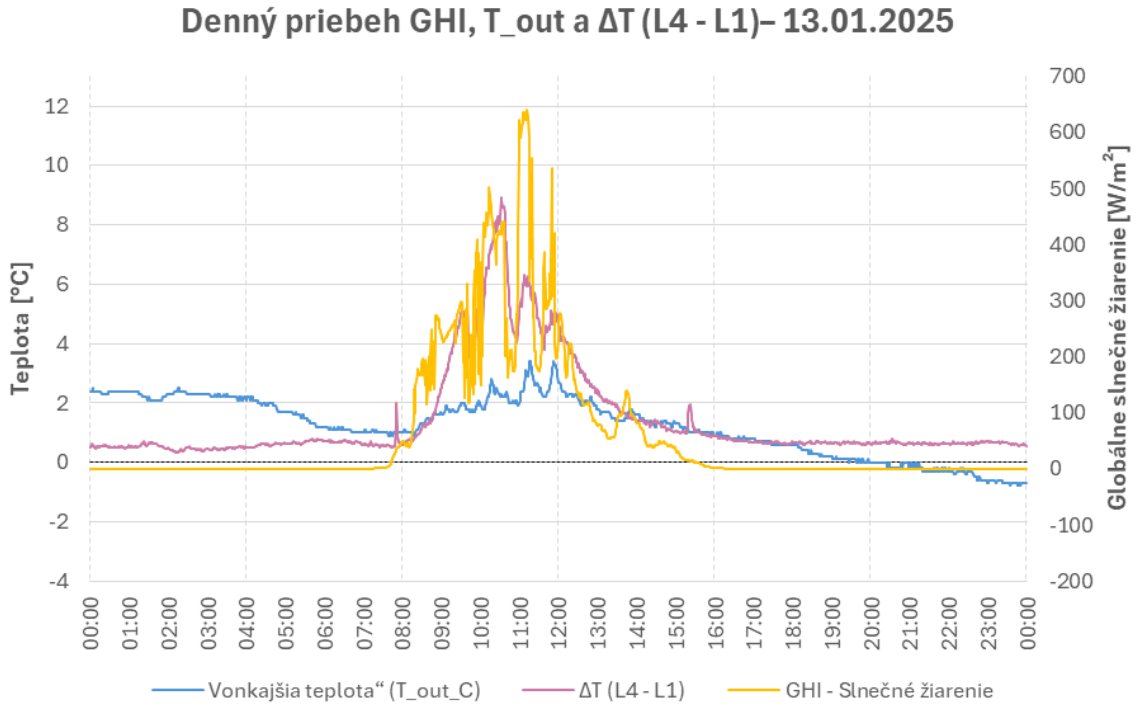
- **11.01.2025** – veterný deň s nižšou oblačnosťou (vyšší GHI_sum), výrazné zásahy TČ (odmrazovanie okolo poludnia).
- **13.01.2025** – jasný deň (najvyššie špičky GHI, výrazný vzťah GHI–ΔT).
- **15.01.2025** – zamračený deň (nízke GHI, potlačený ΔT a vyrovnané rýchlosti).

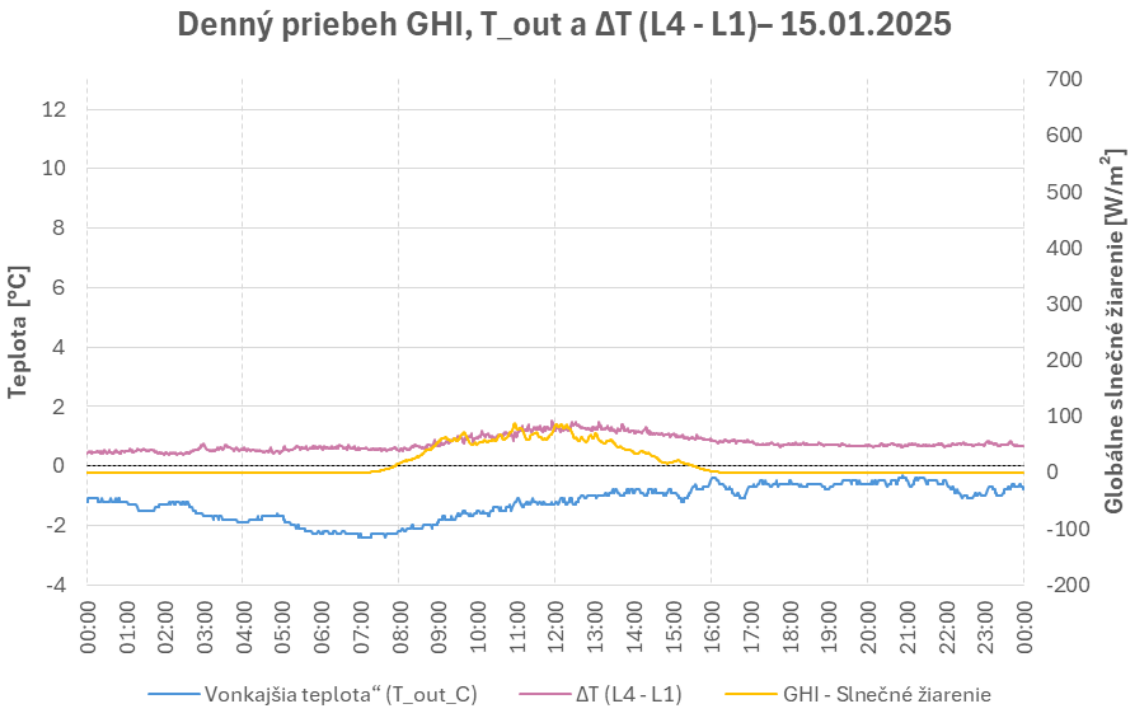
3 VÝSLEDKY

3.1 Denné priebehy GHI, T_out a ΔT_grad

Jasný deň 13.01 priniesol najvyššie špičky žiarenia (GHI_max ≈ 640.7 *W/m²*) a výrazný nárast ΔT_grad s maximom okolo 6.46 °*C*. Veterný deň 11.01 mal síce vyšší denný súčet slnečného žiarenia (GHI_sum ≈ 2019 *Wh/m²*), ale vplyv vetra a prevádzkové zásahy TČ (odmrazovanie) tlmili stabilitu a amplitúdu ΔT. Zamračený deň 15.01 s nízkym žiarením (GHI_sum ≈ 387 *Wh/m²*) vykázal potlačené *ΔT* (maximum okolo 1.71 °*C*). Ráno sú miestami krátke inverzie, poludnie prináša najvýraznejšie zosilnenie *ΔT*.



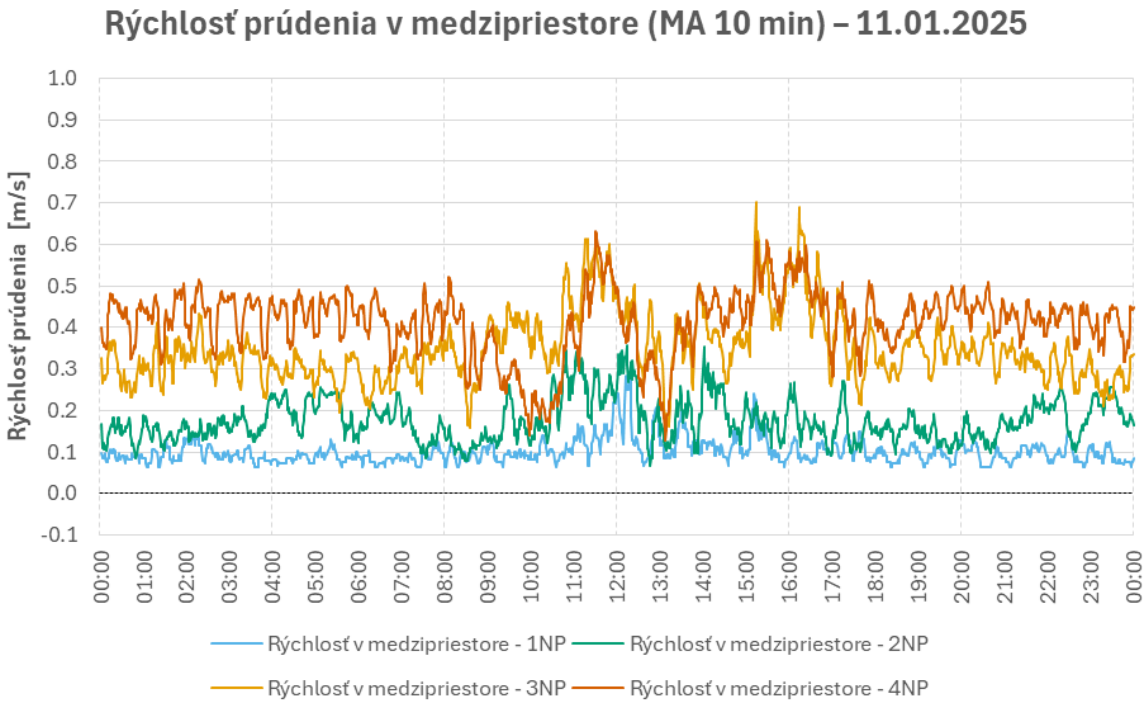


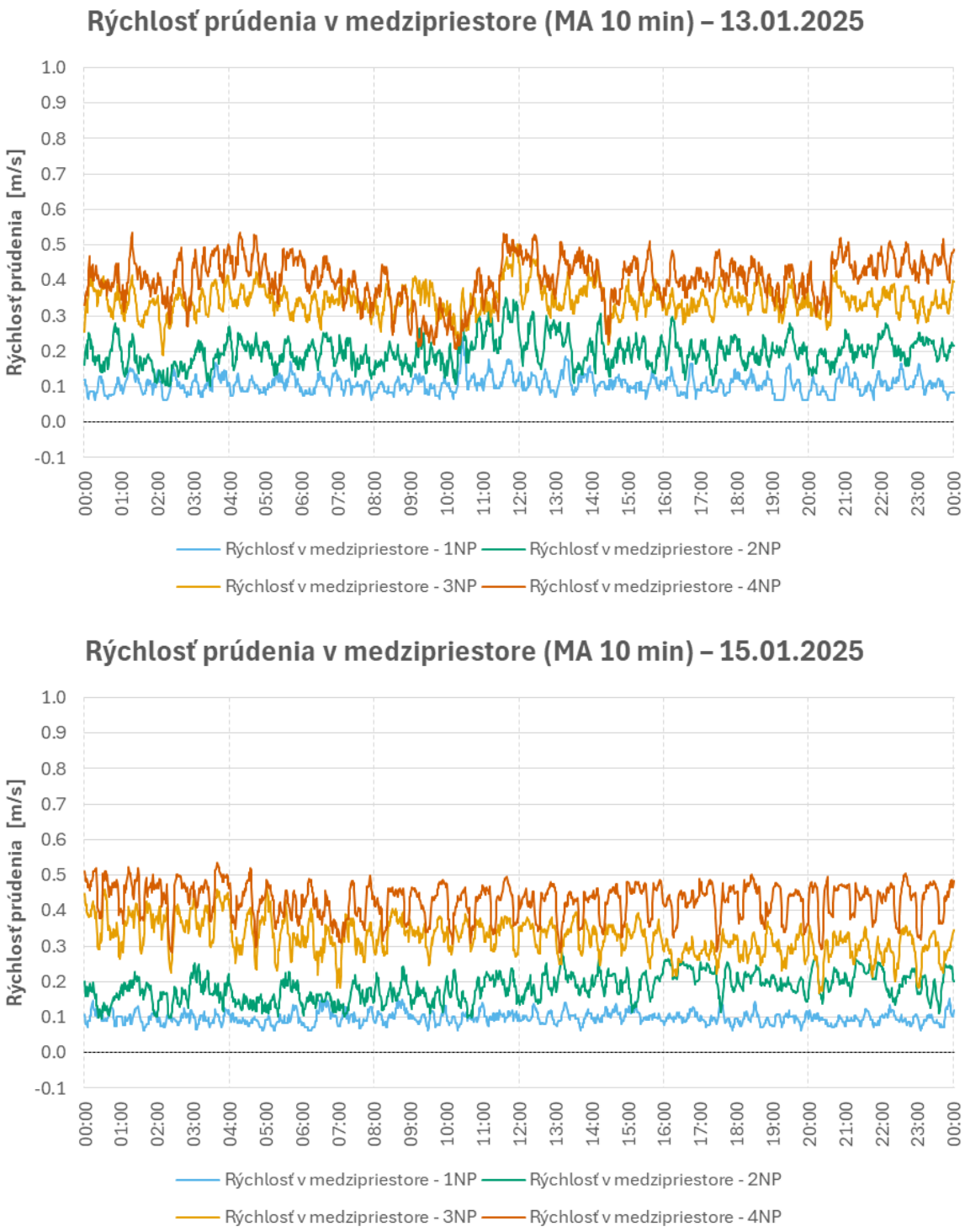


Obr. 2 Denné priebehy (žiarenie, vonkajšia teplota, teplotný rozdiel medzipriestor–exteriér)

3.2 Rýchlosť prúdenia v medzipriestore podľa úrovní (MA 10 min)

Vo všetkých dňoch sa potvrdil výškový gradient rýchlostí: spodná úroveň L1 ≈ 0.10 *m/s*, horná L4 ≈ 0.74–0.89 *m/s* (denné priemery). Deň 11.01 priniesol najvyššie okamžité špičky (napr. L3 max ≈ 1.53 *m/s*), 13.01 mal vyrovnanejší priebeh s jasným rastom po výške a 15.01 nižšie maximá, no priemery blízke jasnému dňu. Gradient je najsilnejší v poludňajších hodinách jasného dňa.

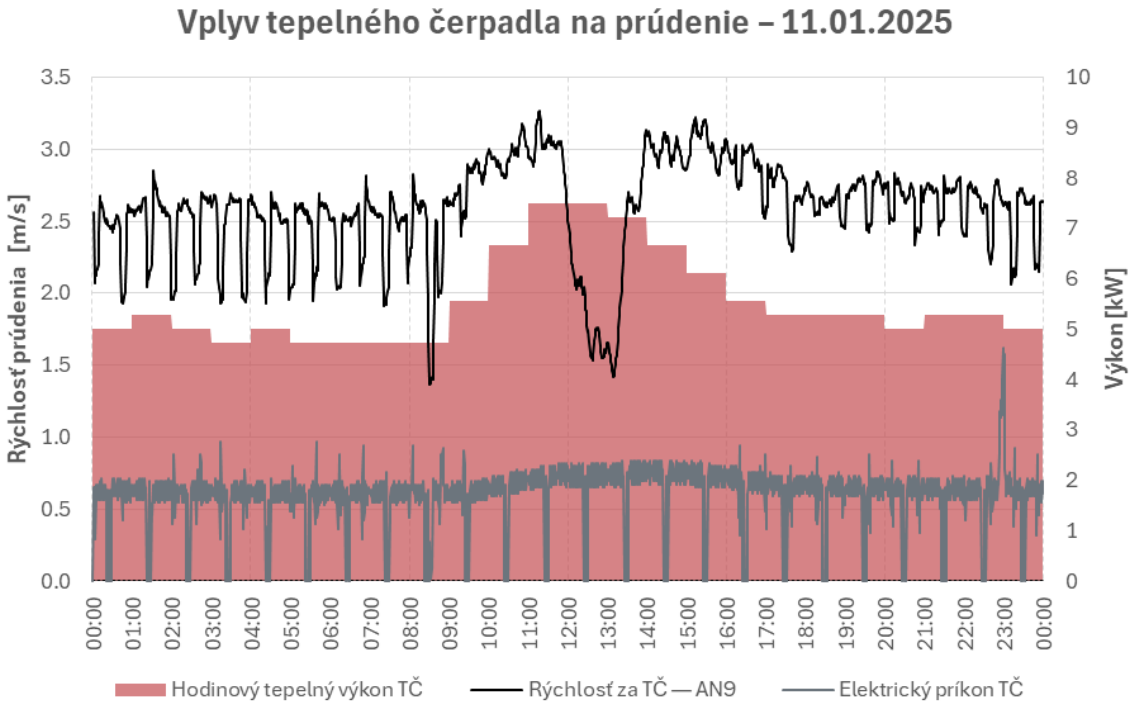


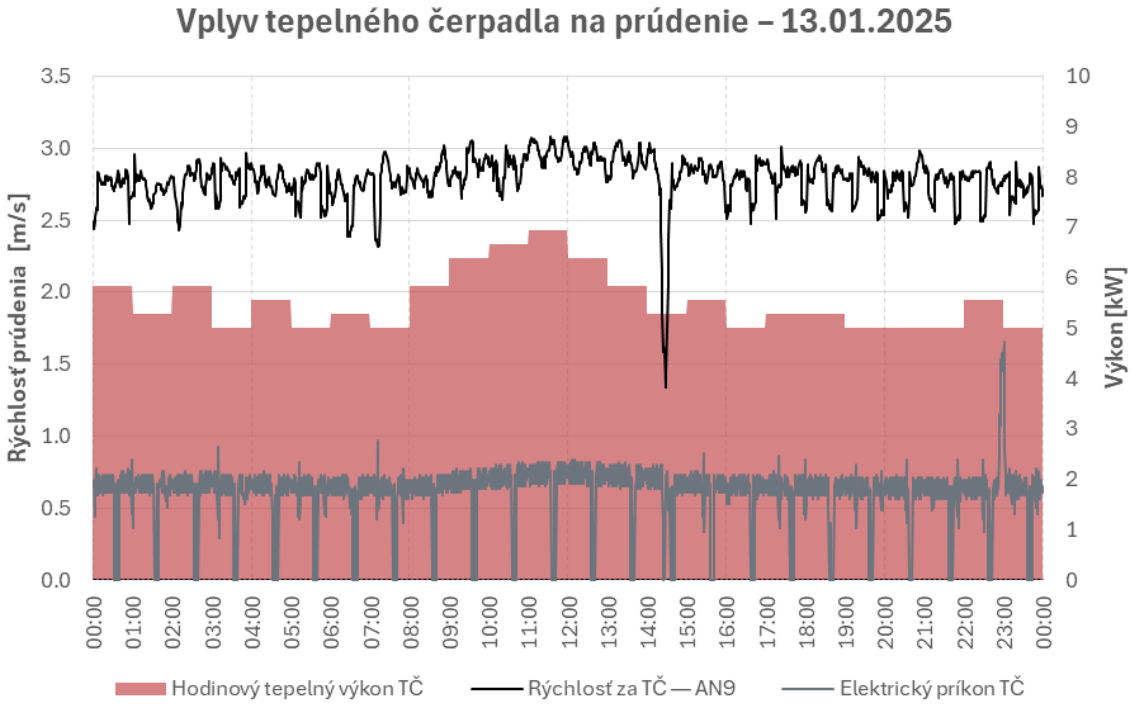


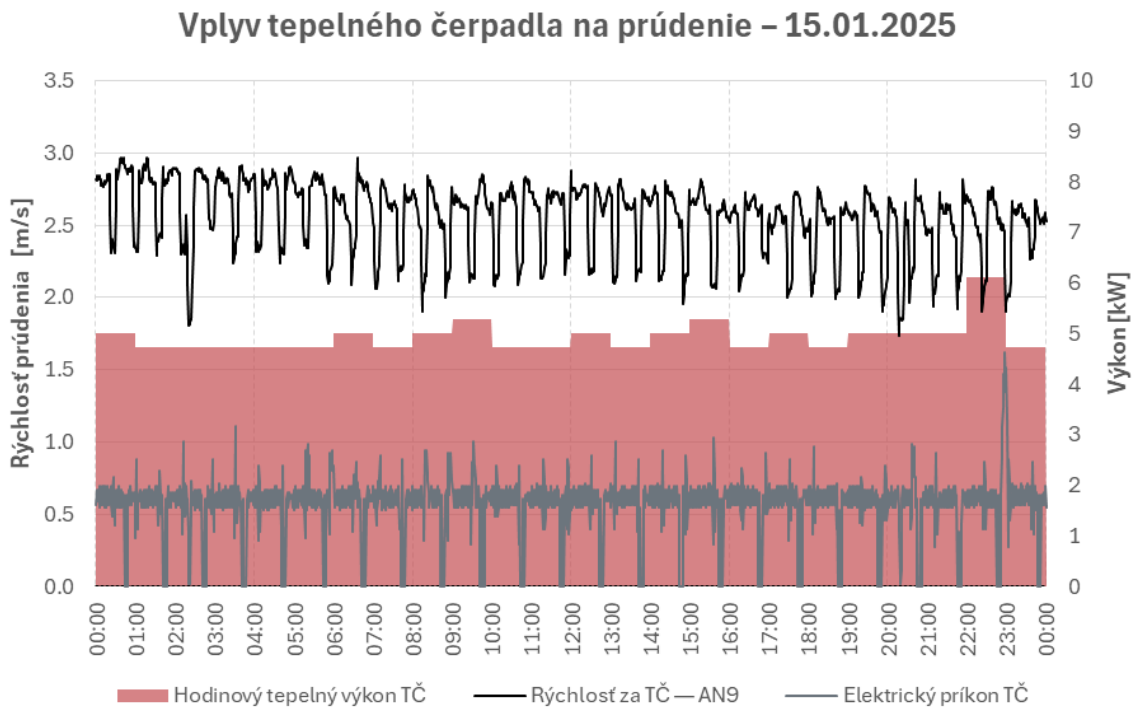
Obr. 3 Rýchlosť prúdenia v medzipriestore po výške (kĺzavý priemer 10 minút)

3.3 Vplyv TČ na prúdenie (AN9, P_el, hodinový tepelný výkon)

Krivka AN9 koreluje s chodom TČ; poklesy okolo poludnia zodpovedajú odmrazovaniu a sú sprevádzané súčasným poklesom AN9 aj hodinového tepla (stĺpce). 13.01 má súvislý poludňajší chod s vyšším prínosom tepla, 11.01 vykazuje výrazný pokles v čase defrostu a 15.01 má nižšie hodnoty počas celého dňa. Elektrický príkon P_el tieto zmeny odráža na sekundárnej osi.


Vplyv tepelného čerpadla na prúdenie – 11.01.2025
Rýchlosť prúdenia [m/s]
Výkon [kW]
Hodinový tepelný výkon TČ
Rýchlosť za TČ — AN9
Elektrický príkon TČ

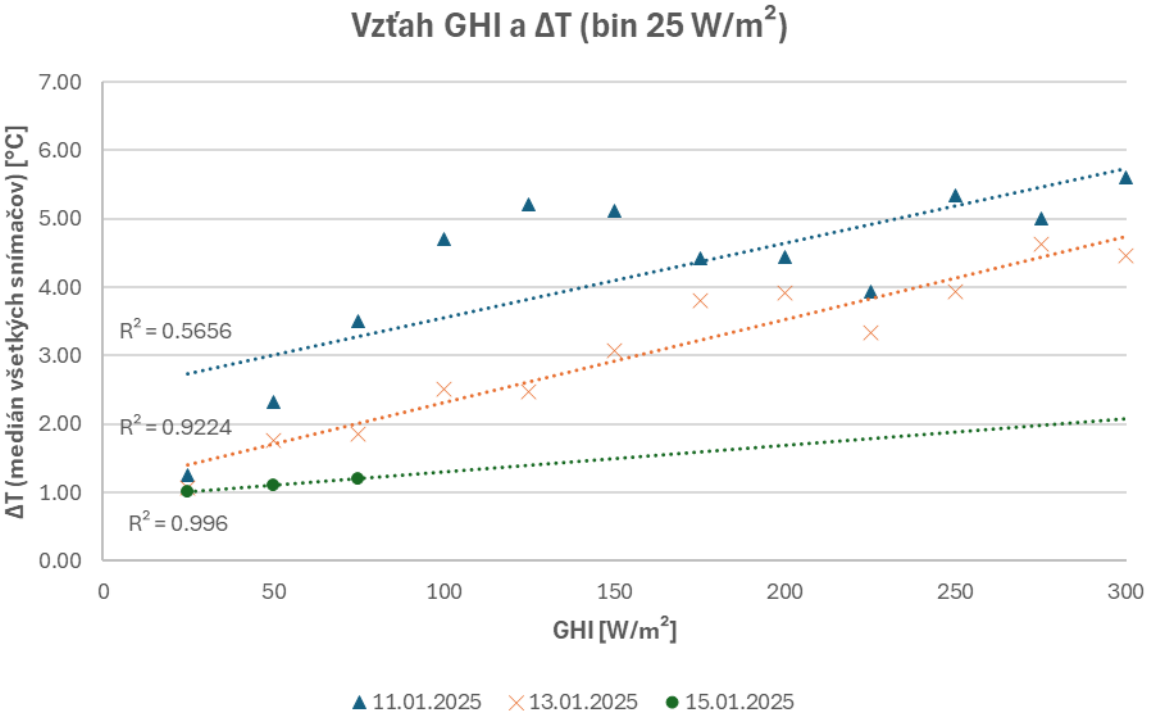

Vplyv tepelného čerpadla na prúdenie – 13.01.2025
Rýchlosť prúdenia [m/s]
Výkon [kW]
Hodinový tepelný výkon TČ
Rýchlosť za TČ — AN9
Elektrický príkon TČ



Obr. 4 Vplyv tepelného čerpadla: rýchlosť za vonkajšou jednotkou, elektrický príkon (pravá os) a hodinovo dodané teplo (stĺpce)

3.4 Krížový vzťah GHI–ΔT

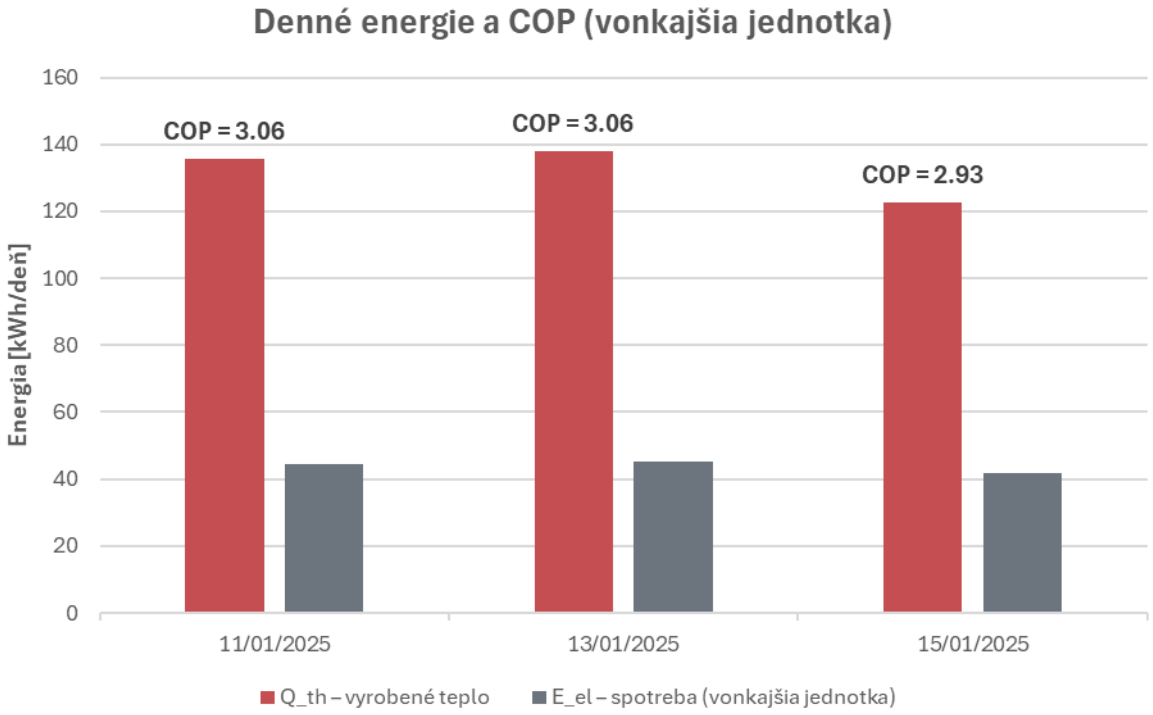
V rozsahu 0–300 *W/m²* sa potvrdzuje približne lineárny vzťah; jasný deň 13.01 má najvyššiu spojnicu (najsilnejší ohrievací efekt), veterný 11.01 väčší rozptyl (vplyv vetra) a zamračený 15.01 zhluky bodov pri nízkom GHI a nízkom ΔT. Trend je použiteľný na jednoduchú predikciu ΔT z okamžitého žiarenia.



Obr. 5 vzťah medzi globálnym horizontálnym žiarením a teplotným rozdielom; zoskupenie po 25 W/m² a lineárna regresia

3.5 *Denné energie a COP*

Denné energie a COP ukazujú podobné správanie pre 11.01 a 13.01 (COP ≈ 3.06), zatiaľ čo pri 15.01 klesá COP ≈ 2.93. Pracovný čas zostáva vo všetkých dňoch podobný (≈ 58–60 %). Absolútne denné teplo aj spotreba elektriny sú najnižšie v zamračenom dni.



Obr. 6 Denné energie a koeficient účinnosti tepelného čerpadla: dodané teplo a elektrická energia vonkajšej jednotky (stĺpce) a denný koeficient účinnosti (krivka)

3.6 *Zhrňujúce tabuľky*

Tabuľka 1 Súhrnné kalkulované hodnoty pre vybrané dni

Metrika	Jednotka	11.01.2025	13.01.2025	15.01.2025
GHI_sum	*Wh/m²*	2018,77	1439,78	386,82
GHI_max	*W/m²*	471,6	640,7	88,3
ΔT_all_med – mean	*°C*	1,409	0,570	0,550
ΔT_grad – max	*°C*	10,17	8,93	1,515
Q_th_day	*kWh/deň*	135,834	138,057	122,779
E_out_day	*kWh/deň*	44,382	45,045	41,924
COP	–	3,06	3,06	2,93
Pracovný čas	*%*	59,2	60,1	57,7

Tabuľka 2 Rýchlosť prúdenia vzduchu v medzipriestore (denné štatistiky, MA 10 min)

Úroveň	11.01.2025		13.01.2025		15.01.2025	
	Denný priemer	Denné maximum	Denný priemer	Denné maximum	Denný priemer	Denné maximum
L1	0,1013	0,9245	0,1072	0,4166	0,0980	0,3660
L2	0,1760	0,7817	0,1989	0,6298	0,1835	0,5754
L3	0,3494	1,5277	0,3433	0,7937	0,3243	0,8846
L4	0,8940	0,8940	0,7384	0,7384	0,8171	0,8171

Jednotka: m/s

4 DISKUSIA

Tri zvolené dni reprezentujú charakteristické zimné situácie. Jasný deň 13.01 priniesol najvyššie špičky žiarenia (GHI_max ≈ 640,7 *W/m²*) a najsilnejší lineárny vzťah medzi žiarením a teplotným rozdielom v medzipriestore; maximum ΔT_grad dosiahlo približne 8,93 °*C*. Veterný deň 11.01 mal vyšší denný súčet žiarenia (GHI_sum ≈ 2019 *Wh/m²*), no nárazy vetra a odmrazovanie tepelného čerpadla okolo poludnia znížili využiteľný teplotný rozdiel a rozkolísali tepelný výkon. Zamračený deň 15.01 s nízkym žiarením (GHI_sum ≈ 387 *Wh/m²*) vykázal najnižšie ΔT (maximum ≈ 1,51 °*C*) a najnižšie denné dodané teplo.
V rozsahu približne 0–300 *W/m²* sa potvrdil takmer lineárny vzťah GHI–ΔT. Jasný deň má najvyššiu spojnicu a najlepšiu zhodu, veterný deň väčší rozptyl a zamračený deň zhluky pri nízkych hodnotách. Tento vzťah je vhodný na jednoduchú predikciu ΔT zo žiarenia v intervaloch bez veterných špičiek a mimo odmrazovania.
Rýchlosti prúdenia v medzipriestore sú nízke až stredné (≈ 0,1–0,7 *m/s*) a rastú po výške fasády; denné priemery približne zodpovedajú hodnotám L1 ≈ 0,10 *m/s*, L2 ≈ 0,18–0,20 *m/s*, L3 ≈ 0,32–0,35 *m/s* a L4 ≈ 0,74–0,89 *m/s*. Hodinové priebehy prúdenia ukazujú pokles rýchlosti za vonkajšou jednotkou aj pokles tepelného výkonu v časoch odmrazovania.
Denné energie potvrdzujú, že COP je v jasnom a veternom dni približne **3,06** a v zamračenom dni klesá na **2,93**, pričom podiel aktívnej prevádzky tepelného čerpadla je vo všetkých dňoch podobný (≈ 58–60 %). Z nameraných dní vychádzajú pre návrh užitočné okrajové podmienky: ΔT ≈ 0,5–10 °*C* a rýchlosti ≈ 0,1–0,7 *m/s*.

4.1 Dopady pre návrh

Odber ohriateho vzduchu z medzipriestoru sa oplatí načasovať na poludnie a obdobia so slabším vetrom; no zároveň sú potrebné vysoké hodnoty slnečného žiarenia (jasný a veterný deň). V zónach s najvyššími solárnymi ziskami je účelné tieniť a znižovať stratové plochy, čím sa zvýrazní teplotný vzostup v medzipriestore.
Pre riadenie prevádzky sa javí vhodná kombinácia prediktívneho vstupu zo žiarenia (okamžitý GHI) so nadväzujúcim ovládaním podľa ΔT a rýchlosti. Jednoduchý model ΔT = a·GHI + b je použiteľný ako pomôcka v intervaloch mimo veterných extrémov a rozmrazovania; pri veterných dňoch je potrebné počítať s väčším rozptylom a korigovať odber podľa aktuálnych rýchlostí.
Z praktického hľadiska sa odporúča pre návrhové výpočty uvažovať priemerné denné teploty ΔT ≈ 0,5–1,5 °*C* v zamračených dňoch a 3–8 °*C* v jasných, s maximami podľa Obr. 2 a Tab. 1. Pre rýchlosti uvažovať profil so vzostupom k horným úrovniam.
Obmedzenia tejto štúdie zahŕňajú krátke časové okno – iba tri dni, definíciu COP vzťahovanú len na vonkajšiu jednotku.

5 ZÁVER

Tri charakteristické zimné dni ukázali, že ΔT v medzipriestore DTF rastie s globálnym slnečným žiarením a že jasné dni poskytujú predpokladané a využiteľné podmienky na odber ohriateho vzduchu. Namerané rýchlosti ~0.1–0.7 *m/s* vykazujú výškový gradient a lokálnu dominanciu ventilátora TČ na výstupe. Denné energie TČ naznačujú COP ≈ 3 v jasnom/veternom dni a pokles v zamračenom dni, v súlade s literatúrou o vplyve nízkej vonkajšej teploty a rozmrazovania. Výsledky poskytujú kvantifikované okrajové podmienky pre CFD a ukazujú nám reálne fyzikálne podmienky v medzipriestore dvojitej fasády pri rôznych klimatických podmienkach v zimnom období.

6 POĎAKOVANIE

Tento výskum bol podporený Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVŠ SR a SAV v projekte VEGA 1/0322/23 a Agentúrou na podporu výskumu a vývoja v projekte APVV-21-0144.

POUŽITÁ LITERATÚRA

[1.] Araji, M. T., et al. (2024). Experimental validation of ventilated double-skin façades. Energy and Buildings, 256, 111500.

[2.] ASHRAE (2016). Interpretation IC 62.1-2007-21. ANSI/ASHRAE Standard 62.1 – Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.

[3.] Bielek, J., & Klem, R. (2020). Physical Cavity of a Double Skin Facade as a Source of Pre-Heated Air in the Winter Season for the Heat Recovery Unit of a Facade. Slovak Journal of Civil Engineering, 27(4), 1–10.

[4.] Favoino, F. (2015). Assessing the performance of an advanced integrated facade by means of simulation: The ACTRESS facade case study. Journal of Facade Design and Engineering, 3(2), 105–127. https://doi.org/10.3233/FDE-150038

[5.] IEA SHC/ECBCS (2007). Double Skin Facades – A Literature Review (Annex 43 / Task 34).

[6.] ISO (2014). ISO 13612-2: Heating and cooling systems in buildings — Method for calculation of the system performance and system design for heat pump systems — Part 2: Energy performance calculation based on primary energy.

[7.] Janković, A., et al. (2022). Characterization of a naturally ventilated double-skin façade: Full-scale testbed. Energy and Buildings, 262, 111921.

[8.] KATUNSKÝ, Dušan, Martin LOPUŠNIAK, Erika DOLNÍKOVÁ a Marek ZOZULÁK, 2018. *Adaptívne prvky transparentnej fasády a ich vplyv na kvalitu vnútorného prostredia*

[9.] Marsik, T., et al. (2023). Empirical Study of the Effect of Thermal Loading on the Performance of an Air-Source Heat Pump. NREL/TP-5500-85081.

[10.] Nawaz, K., et al. (2021). A Critical Literature Review of Defrost Technologies for Heat Pumps. Proceedings of Purdue IRACC.

Veronika Talašová[1]
Študijný program: Teória a konštrukcie pozemných stavieb, 4.ročník

KLIMATICKÉ ZMENY: SÚČASNÝ STAV V EURÓPE A NA SLOVENSKU A ICH VPLYV NA SPOTREBU ENERGIE V BUDOVÁCH

CLIMATE CHANGE: CURRENT STATUS IN EUROPE AND SLOVAKIA AND ITS IMPACT ON ENERGY CONSUMPTION IN BUILDINGS

Abstract
Global temperature change will almost certainly lead to changes in energy use in buildings. Energy consumption is a fundamental factor related to sustainable development and is closely linked to the main threat to the environment posed by human society, which is the production of greenhouse gases and the associated global warming. The regulation and optimization of energy consumption in the field of energy efficiency of buildings is considered essential. In the search for a sustainable strategy, the efficient use of energy from renewable energy sources with minimal environmental impact is crucial, which is at the heart of the fight against climate change. The positive effects of energy renovation on climate change are primarily related to the elimination of emissions of harmful particles, which is the result of a reduction in the amount of energy consumed in the building.

Kľúčové slová / Key Words
klimatické zmeny, energetická hospodárnosť, emisie skleníkových plynov, udržateľný rozvoj

1. Úvod

Stavebný sektor je jeden z najväčších spotrebiteľov energie, pričom sa odhaduje, že budovy po celom svete sú zodpovedné za viac ako 40% celkovej spotreby primárnej energie a s tým súvisiacou tvorbou skleníkových plynov. (1) V rozvinutých krajinách sa takmer polovica tejto energie využíva na vykurovanie, vetranie a klimatizáciu budov. Väčšina budov sa v súčasnosti navrhuje tak, aby vydržala viac ako 50 rokov, pričom budovy ako súčasť infraštruktúry musia dlhodobo odolávať meniacim sa klimatickým podmienkam. Pri návrhu treba brať do úvahy, že budovy budú vystavené klíme, ktorá bude postupne teplejšia a preto je potrebné zabezpečiť, aby súčasné aj budúce stavby spoľahlivo pracovali za meniacich sa klimatických podmienok.

1.1 Prejavy zmeny klímy v Európe

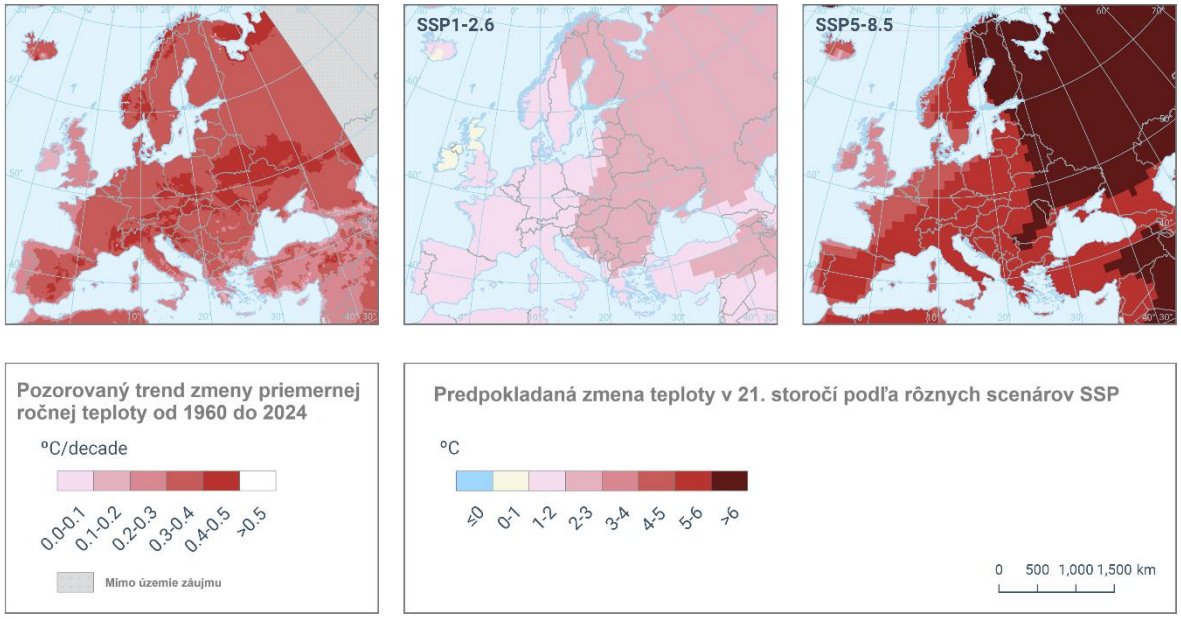
Európa patrí medzi kontinenty, ktoré sa otepľujú rýchlejšie ako celosvetový priemer. Podľa údajov Európskej environmentálnej agentúry (EEA) sa priemerná teplota v Európe zvýšila priemerne o 2,2°C v porovnaní s predindustriálnym obdobím (1850–1900), čo je viac ako dvojnásobok globálneho priemeru. Obzvlášť vysoké otepľovanie bolo pozorované nad východnou Európu, Škandináviou a východnou časťou Pyrenejského polostrova. (2)

[1] Veronika, Talašová, Ing., Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

V období 1960-2022 stúpla ročná priemerná teplota vzduchu v S a SZ Európe o približne 0,3-0,4°C za dekádu, zatiaľ čo v J a JV Európe bol nárast miernejší, približne o 0,25-0,3 °C za dekádu. (3)

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. (4)

Extrémne prejavy počasia spôsobujú každoročne rozsiahle škody na majetku a ľudskom zdraví, čo predstavuje vysoké náklady pre hospodárstvo krajín. Podľa EEA spôsobili extrémne klimatické udalosti v Európe v období 1980–2022 ekonomické škody vo výške viac než 650 miliárd eur, pričom povodne a vlny horúčav patrili medzi najnákladnejšie javy. (5)



Obrázok 1: Pozorovaný trend zmeny priemernej ročnej teploty od roku 1960 do roku 2024 (ľavý panel) a predpokladaná zmena teploty v 21. storočí podľa rôznych scenárov SSP (pravé panely) v Európe (EEA)

1.2 Prejavy zmeny klímy na Slovensku

Oblasť strednej Európy vrátane Slovenskej republiky sa vyznačuje všeobecnými črtami zmeny klímy, ktoré sa prejavujú nárastom teplôt, zmenami zrážok, poklesom snehovej pokrývky a častejším výskytom extrémnych poveternostných javov. Tieto zmeny významne ovplyvňujú prírodné ekosystémy, poľnohospodárstvo, vodné zdroje a urbanizované prostredie. (6) Dlhodobé merania ukazujú, že od roku 1881 došlo na Slovensku k nárastu priemernej ročnej teploty vzduchu o približne 1,8 až 2,0 °C s priemerným nárastom 0,15°C za desaťročie. Najvýraznejší nárast teplôt je zaznamenaný v letných mesiacoch, kde teploty vzrástli o viac ako 2,0 °C, pričom lokálne hodnoty v južných oblastiach krajiny dosahujú až 3,0 °C. (6).

Za posledné dve desaťročia sa zvýšila frekvencia extrémnych maximálnych a minimálnych denných teplôt vzduchu, pričom medzi rokmi 2001-2022 sa zvýšila frekvencia období sucha bez zrážok, čo v kombinácii s teplejšími klimatickými podmienkami viedlo k častejším pôdnym suchám. (7) Dochádza k striedaniu sa extrémne vlhkých a suchých rokov v krátkom časovom intervale. V posledných 15 rokoch sa častejšie vyskytovali extrémne denné a niekoľkodenné úhrny zrážok, čo

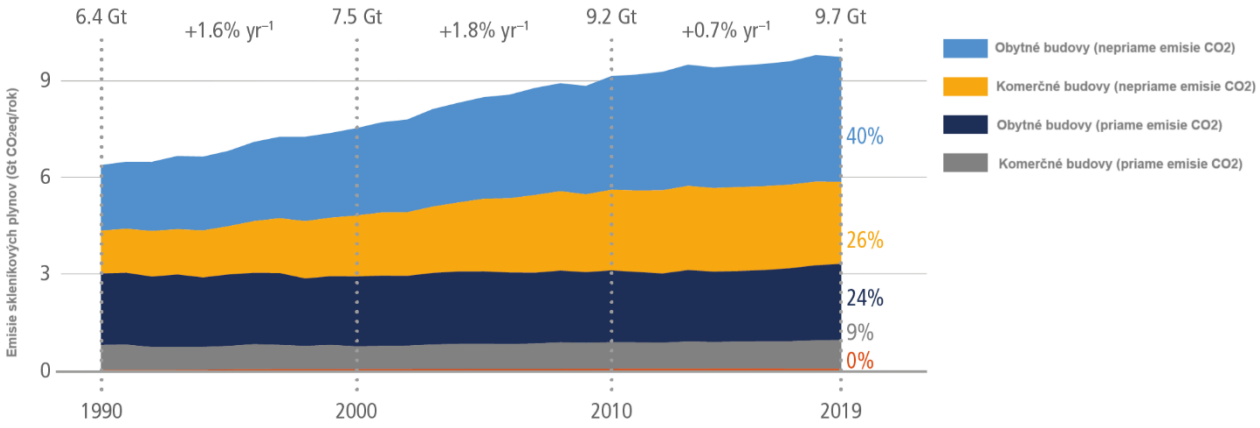
v danom období zvyšovalo riziko lokálnych povodní. Okrem toho sa zaznamenal pokles relatívnej vlhkosti vzduchu a priestorovo rozdielny ročný úhrn atmosférických zrážok. (8) Zvyšujúce sa teploty a znižujúca sa relatívna vlhkosť vzduchu vedú k výraznému poklesu počtu dní so snehovou pokrývkou. Pokles snehovej pokrývky sa zaznamenal najmä v nadmorských výškach do 1000 m n.m.. Snehová pokrývka je čoraz nepravidelnejšia a častejšie sa vyskytujú zimné povodne. (9)

Prognózy ďalšieho vývoja klímy na Slovensku hovoria o postupnom zvyšovaní priemernej ročnej teploty o 2 až 4 °C v porovnaní s rokmi 1961-1980. Je predpoklad mierneho nárastu ročných úhrnov zrážok počas roka okrem leta, kedy sa naopak očakáva slabý pokles úhrnov zrážok a zvýšenie premenlivosti úhrnov zrážok, pričom sa predĺžia a budú sa častejšie vyskytovať málo zrážkové obdobia striedané zrážkovo výdatnejšími krátkymi dažďovými obdobiami. Zosilnenie búrok v lete prinesie častejšie silný vietor, víchrice, či dokonca tornáda. (6) (10)

Všetky pozorované vplyvy zmeny klímy na Slovensku prekonali svoje predpovede z hľadiska frekvencie a intenzity. Klimatické podmienky zaznamenané medzi rokmi 2001 a 2017 sa pôvodne predpokladali okolo roku 2030. (9)

2. Skleníkové plyny a spotreba energie v stavebnom sektore

Emisie skleníkových plynov zo stavebného sektoru sa v období od roku 1970 viac ako zdvojnásobili. Väčšina týchto emisií sú nepriame emisie, ktoré počas sledovaného obdobia rástli na rozdiel od priamych emisií, ktoré sa vyznačovali stagnáciou (Obr.2). Nepriame emisie vznikajú v energetickom sektore pri výrobe elektriny a centrálneho tepla, ktoré budovy následne spotrebúvajú. Rozlíšenie medzi priamymi a nepriamymi emisiami je kľúčové pre pochopenie environmentálneho dopadu sektora budov. Priame emisie vznikajú využívaním elektrickej energie v budovách (spaľovaním fosílnych palív na zabezpečenie vykurovania, ohrevu vody, varenia, či klimatizácie). Pri správnom započítaní celkových prevádzkových emisií je teda potrebné analyzovať spojený systém výroby a spotreby energie, nie len samotnú budovu. Celkovú uhlíkovú stopu budov počas ich životného cyklu dotvárajú aj emisie, ktoré vznikajú počas výroby stavebných materiálov, ich dopravy a výstavby. Medzivládny panel pre zmenu klímy zdôrazňuje, že energetické štatistiky často zahŕňajú len prvé dve kategórie emisií, pričom emisie z výroby stavebných materiálov sa zanedbávajú, avšak rastúci význam ich podielu je neprehliadnuteľný. (11)



Obrázok 2: Priame a nepriame emisie (zo spotreby elektrickej energie a vykurovania) v budovách (IPCC, 2022)

V roku 2023 vyprodukovali budovy približne 34 % globálnych emisií CO_2, pričom 32 % globálnej konečnej energie bolo spotrebovaných v budovách. Z toho 27 % pripadalo na prevádzkové emisie

budov a 7–9 % na emisie spojené s výrobou stavebných materiálov, ako je cement, oceľ a hliník, najväčší podiel tvorili nepriame emisie. (12)

Z uvedeného vyplýva, že viac ako polovica klimatického dopadu budov vzniká mimo fyzických hraníc budov, čo má zásadný význam pre navrhovanie dekarbonizačných politík. (13).

V roku 2023 sa po prvýkrát od roku 2015 podarilo oddeliť rast výstavby budov od rastu emisií v tomto sektore, čo naznačuje pozitívny trend v dekarbonizácii stavebného sektora. Prijatím povinných energetických predpisov pre budovy v súlade s nulovými čistými emisiami, povinnými výkonnostnými normami a využitím investícií do energetickej efektívnosti sa energetická náročnosť sektora znížila takmer o 10 %, zatiaľ čo podiel obnoviteľných zdrojov energie na konečnom dopyte po energii sa zvýšil takmer o 5 %. (14)

Ako bolo spomenuté vyššie, v roku 2023 spotrebovali budovy približne 32 % globálnej konečnej energie, pričom najväčší podiel energie bol využitý na vykurovanie, nasledovaný ohrevom vody a spotrebou elektriny na varenie a prevádzku malých spotrebičov. V komerčných budovách významne prispievajú osvetlenie, chladenie a prevádzka technológií. V období 1990-2019 spotreba energie na vykurovanie rástla len málo (~ 10 %), za to spotreba energie na varenie narástla približne o 89 %, na ohrev vody o ~ 73 %, na chladenie o ~ 75 % a na pripojené a malé spotrebiče narástla spotreba energie až o ~ 280 %. (11) Tieto trendy naznačujú, že hoci vykurovanie zostáva veľkou položkou, rast spotreby energie je čoraz viac ťahaný ostatnými koncovými použitiami – najmä chladením, spotrebičmi a varením. Spotreba energie na chladenie priestorov je najrýchlejšie rastúcim koncovým využitím energie v budovách, pričom od roku 2000 rastie priemerne o 4 % ročne. Tento trend je spôsobený rastúcimi globálnymi teplotami a častejšími a intenzívnejšími vlnami horúčav. (12)

Vzhľadom na rastúci podiel elektrickej energie v spotrebe budov (z 30 % v roku 2011 na 35 % v roku 2021) je nevyhnutné zvyšovať podiel obnoviteľných zdrojov v budovách, pričom v roku 2022 predstavovali obnoviteľné zdroje len 6%, čo výrazne zaostáva za pokrokom potrebným na dosiahnutie cieľa 18% v roku 2030. (15)

Na Obr.3 sú projekcie využitia tepelnej energie v bytových aj komerčných budovách pre rok 2050 v porovnaní s rokom 2010. Je zrejmé, že väčšina tepelnej energie je spotrebovaná vo vyspelých krajinách ako napr. Severná Amerika alebo Európa, pričom tendencia rásť je veľmi mierna v porovnaní s rozvojovými krajinami, kde ja nárast značný. Komerčné budovy v porovnaní s bytovým fondom predstavujú len 10 až 30% z celkovej spotreby energie v stavebníctve vo väčšine sveta s výnimkou Číny.

3. Skleníkové plyny a spotreba energie v stavebnom sektore

Hodnoty celkovej spotreby energie budov a ich významný podiel na celosvetovej konečnej energetickej spotrebe a tvorbe emisií poukazujú na strategický význam budov v kontexte klimatickej zmeny. Klimatické zmeny zvyšujú energetické nároky budov, najmä v dôsledku rastúcich teplôt a extrémnych poveternostných javov. V súčasnosti sa preto otázka energetickej efektívnosti stáva nevyhnutnou súčasťou návrhu, výstavby a prevádzky budov, pričom cieľom je minimalizovať spotrebu energie a zároveň zabezpečiť komfortné podmienky vnútorného prostredia.

Nárast potreby energie na chladenie v dôsledku zvyšovania globálnych teplôt vedie k zvýšeniu tvorby emisií z výroby energie. Výsledkom je akcelerácia klimatickej zmeny, ak nie je výroba energie dekarbonizovaná. Naopak, v chladnejších regiónoch sa pozoruje znižovanie potreby vykurovania, avšak tento efekt je zatiaľ menší ako rastúci dopyt po chladení. (16)

Rozvinuté krajiny, najmä v Európe a Severnej Amerike, vykazujú stagnujúcu alebo mierne klesajúcu energetickú spotrebu v budovách vďaka zavádzaniu prísnych noriem energetickej efektívnosti, lepšej izolácii a využívaniu obnoviteľných zdrojov energie. (17) Tempo zmeny je však nedostatočné na dosiahnutie cieľa uhlíkovej neutrality do roku 2050. (11) Naopak, v rozvojových

krajinách sa spotreba energie v budovách rýchlo zvyšuje. Dôvodom je rast populácie, urbanizácia a zlepšujúci sa prístup k elektrine. Tieto krajiny často čelia obmedzeným regulačným rámcom a vysokému podielu fosílnych zdrojov energie, čo spôsobuje rast emisií a tlmí snahy o dekarbonizáciu.

4. Hlavné prístupy znižovania skleníkových plynov v stavebnom sektore

Podľa hodnotenia IPCC AR6 (11) možno mitigáciu emisií v sektore budov systematicky rozdeliť do troch hlavných a vzájomne sa doplňajúcich prístupov:

- znižovanie energetického dopytu,
- dekarbonizácia dodávky energie,
- materiálová efektívnosť a recyklácia.

Každý z týchto pilierov predstavuje osobitú, ale komplementárnu časť komplexnej transformácie budov smerom k uhlíkovej neutralite.

4.1 Znižovanie dopytu po energii

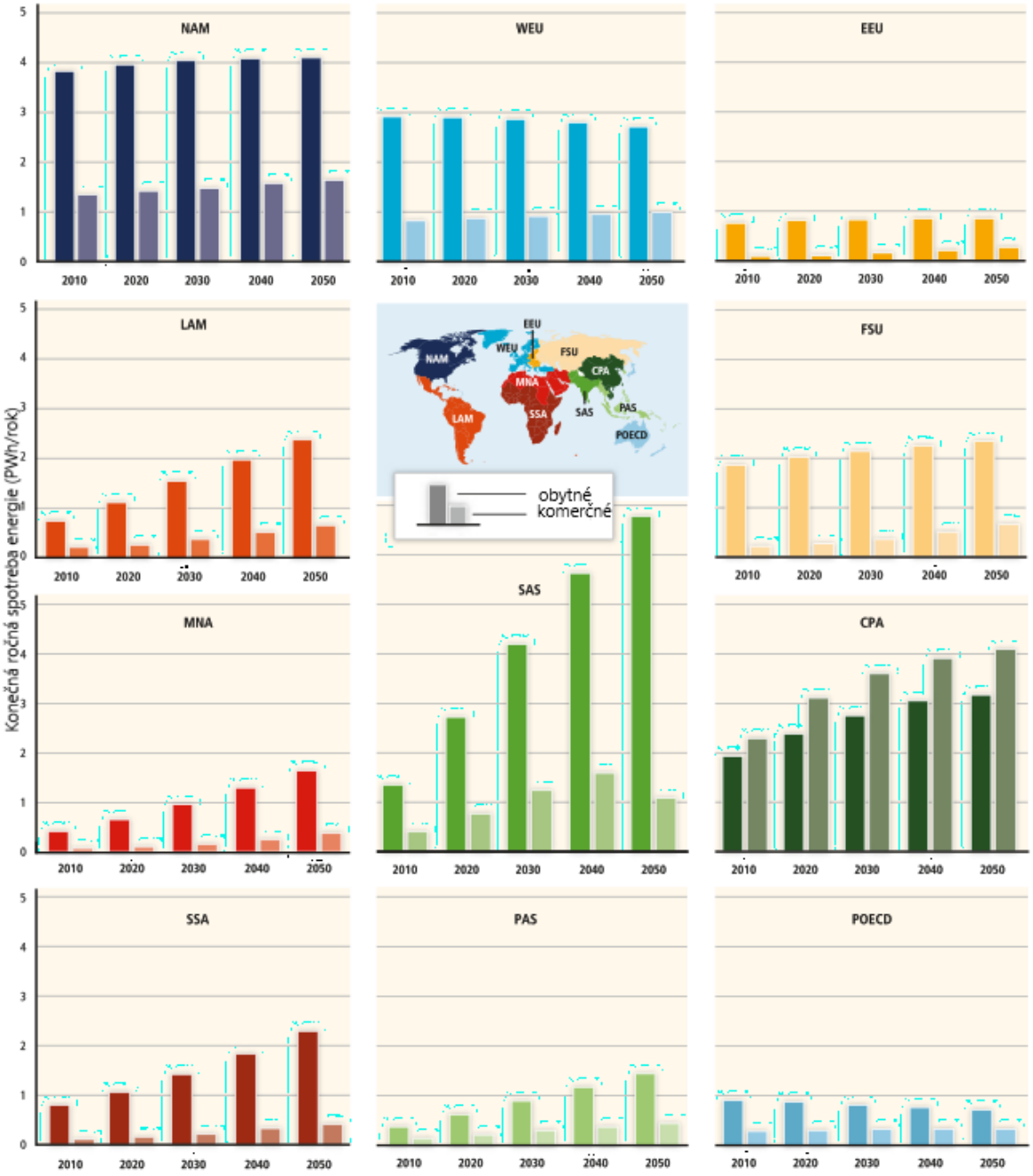
Prvým a najefektívnejším prístupom je redukcia potreby energie prostredníctvom zvýšenia energetickej efektívnosti a zavádzania pasívnych princípov navrhovania budov. IPCC (2022) identifikuje široké spektrum opatrení – od zlepšenia tepelnoizolačných vlastností obálky, výmeny okien s trojsklom, optimalizácie orientácie budov, riadeného vetrania s rekuperáciou tepla, až po adaptívne stratégie pasívneho chladenia, tienenia alebo denného osvetlenia. Tieto zásahy môžu znížiť spotrebu energie na vykurovanie a chladenie až o 40–60 % bez zníženia úrovne komfortu. V mnohých prípadoch sú tieto opatrenia ekonomicky návratné, keďže úspory energie v prevádzke prevyšujú investičné náklady počas životného cyklu budovy. Rekonštrukcia existujúcich budov so zameraním na obálku budovy a technológiu sa stáva kľúčovým prvkom klimatickej politiky. (18)

Prechod na tepelné čerpadlá a elektrické systémy znižuje priame emisie a zlepšuje účinnosť využitia primárnej energie. Účinnosť tepelných čerpadiel umožňuje nahradiť spaľovacie zdroje s výrazne nižšími emisiami – avšak len ak je elektrina nízkouhlíková.

4.2 Dekarbonizácia dodávky energie

Druhým pilierom mitigácie je dekarbonizácia energetického sektoru, ktorý zásobuje budovy teplom, chladom a elektrickou energiou. Základným trendom je elektrifikácia vykurovania a prípravy teplej vody (napr. prostredníctvom tepelných čerpadiel, elektrických kotlov či hybridných systémov) v kombinácii s rozširovaním obnoviteľných zdrojov energie v národných a regionálnych energetických sieťach. Kľúčovú úlohu pritom zohráva aj rozvoj centralizovaných nízkouhlíkových zdrojov, ako sú systémy diaľkového vykurovania napájané biomasou, geotermálnou energiou alebo odpadovým teplom z priemyslu.

V scenároch IPCC kompatibilných s cieľom 1,5 °C sa predpokladá, že do roku 2050 bude viac ako 90 % elektriny pochádzať z obnoviteľných zdrojov, čím sa nepriame emisie z budov prakticky eliminujú. (19)



Obrázok 3: Konečná ročná spotreba energie v [PWh/rok] v jednotlivých svetových regiónoch pre obytné a komerčné budovy. Historické údaje podľa IEA štatistík, predpovede na základe predpokladu scenáru „zmrznutej efektivity" (energetická efektivita sa nezmení) (IPCC WG3 AR5)

4.3 Materiálová efektívnosť a recyklácia

Tretím pilierom mitigácie, ktorý IPCC zdôrazňuje čoraz viac, je zníženie emisií viazaných na výrobu, prepravu a likvidáciu stavebných materiálov. Vzhľadom na rozsah novej výstavby, najmä v Ázii a Afrike, predstavujú tieto emisie významnú a často prehliadanú časť uhlíkovej stopy budov. Medzi hlavné stratégie patria:

- používanie recyklovaných a nízkouhlíkových materiálov (napr. zelený cement, oceľ vyrábaná elektrických oblúkových peciach, biokompozity, používanie dreva),

- zníženie materiálovej náročnosti konštrukcií optimalizáciou návrhu (nižší objem materiálov, modulárna výstavba),
- predĺženie životnosti a adaptabilita budov,
- a rozvoj cirkulárnej ekonomiky v stavebníctve.

IPCC zdôrazňuje, že budovy by sa mali považovať za aktívne prvky energetického systému, nie len pasívnych spotrebiteľov. To pre budovy znamená:

- integráciu fotovoltických systémov,
- lokálne akumulácie energie (batérie, tepelné zásobníky),
- inteligentné riadenie dopytu a flexibilitu.

Tieto technológie umožňujú budovám prispievať k stabilizácii siete a znižovať špičkové zaťaženie, čím sa nepriamo znižujú aj emisie z výroby elektriny.

Podľa IPCC môžu materiálové opatrenia znížiť emisie z výroby materiálov o 40–50 % do roku 2050, najmä ak sa skombinujú s obnoviteľnými zdrojmi energie vo výrobe stavebných materiálov.

Tieto tri prístupy – znižovanie dopytu po energii, dekarbonizácia dodávky energie a materiálová efektívnosť – sa navzájom posilňujú. Ich integrované uplatnenie môže viesť k zníženiu celkových emisií z budov o 60–90 % do roku 2050 v porovnaní s úrovňou roku 2019. (20) Rozsah tohto zníženia závisí od rýchlosti implementácie technológií, ambícií národných politík a rýchlosti dekarbonizácie energetiky. Pri optimálnom nasadení všetkých troch stratégií sa sektor budov môže do polovice storočia stať takmer uhlíkovo neutrálnym, čím významne prispeje k naplneniu cieľov Parížskej dohody.

5. Záver

Energetická spotreba budov je významným faktorom klimatickej zmeny a predstavuje jednu z najväčších výziev a zároveň i príležitostí pri riešení klimatickej zmeny. Hoci sektor budov patrí medzi najväčších producentov emisií, zároveň disponuje veľkým potenciálom úspor prostredníctvom technologických inovácií a efektívneho návrhu.

Zníženie energetickej náročnosti budov vyžaduje integrovaný prístup, ktorý spája projektový návrh, energetické systémy a politické opatrenia. Prepojenie energetickej efektívnosti, obnoviteľných zdrojov a udržateľného stavebníctva predstavuje nevyhnutnú cestu k naplneniu cieľov Parížskej dohody a Európskej zelenej dohody.

Literatúra

[1] KRARTI, M.: *Energy audit of building systems. An engineering approach. Second edition.* Boca Raton, FL: Taylor and Francis Group, 2011. ISBN 978-4398-2872-4.

[2] EEA: *Global and European temperatures – Indicator assessment* [online]. Copenhagen: European Environment Agency, 2024.
Dostupné na: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/global-and-european-temperatures

[3] IPCC: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[4] IPCC*: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009325844.

[5] EEA: *Economic losses and fatalities from weather- and climate-related extremes in Europe (1980–2022)*. Indicator assessment. Copenhagen: European Environment Agency, 2023. DOI: 10.2800/151160.

[6] FARKAS, R.: *Climate risk assessment in Slovakia: Key findings on urban areas* [online]. Elsevier, 2025. Dostupné na: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095525002779#bi0005

[7] CHOVANCOVÁ, et al.: *The Eight National Communication of the Slovak Republic on Climate Change*. Bratislava: Ministry of Envrionment of the Slovak Republic & Slovak Hydrometeorological Institute, 2024.

[8] Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky: *Stratégia adaptácie Slovenskej republiky na zmenu klímy. Aktualizácia 2018* [online]. 2018. Dostupné na: https://www.minzp.sk/files/odbor-politiky-zmeny-klimy/strategia-adaptacie-sr-zmenu-klimy-aktualizacia.pdf

[9] Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky. *Identifying climate risk levels of Slovak municipalities. Economic analysis* 14 [online]. 2023. Dostupné na: https://www.minzp.sk/files/iep/analyzy/iep-identifying-climate-risk-levels-2023.pdf

[10] Slovenská agentúra životného prostredia: *Scenáre zmeny klímy na Slovensku* [online]. 2024. Dostupné na: https://www.sazp.sk/dokument/f/2-scenare-zmeny-klimy-sr-pecho.pdf

[11] IPCC: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009157926.

[12] UNEP: *Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025.* Nairobi: International Energy Agency & United Nations Environment Programme, 2025.

[13] IPCC: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

[14] UNEP: *Emissions from the building sector stopped rising for the first time* [online]. UN finds, 2020. Dostupné na: https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/emissions-building-sector-stopped-rising-first-time-2020-un-finds).

[15] UNEP: *Not yet built: Purpose global building sector emissions still high* [online]. UNEP News. 2022. Dostupné na: https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/not-yet-built-purpose-global-building-sector-emissions-still-high).

[16] IEA: *World Energy Outlook 2024*. Paris: International Energy Agency, 2024.

[17] European Commission: *Energy Performance of Buildings Directive*. Brussels, 2025.

[18] McKinsey: *Global Eenergy Perspective 2025*. New York, 2025.

[19] IEA: *World Energy Outlook 2021* [online]. Paris: International Energy Agency, 2021. Dostupné na: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021.

[20] IPCC: *Summary for Policymakers (SPM).* In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

Peter Trudič[1]
Študijný program: Teória konštrukcií pozemných stavieb, 2. ročník

VPLYV AERODYNAMIKY NA EXTERIÉROVÉ ZÓNY

THE INFLUENCE OF AERODYNAMICS ON OUTDOOR SPACES

Abstract
This work examines the aerodynamic behavior of wind in urban exterior zones such as roofs, terraces, and pedestrian areas between tall buildings. Wind acts not only as a structural load but also affects comfort and safety in outdoor environments. Particular focus is given to the *downwash effect*, where wind flowing down building façades creates intensified airflows at ground level. The study explores how architectural form and urban planning can mitigate these effects using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. Results show that proper building placement, street orientation, and open-space design significantly reduce wind discomfort. Integrating aerodynamic principles into urban and architectural design enhances safety and sustainability in exterior spaces.

Kľúčové slová / Key Words
Wind comfort; rooftop design; downwash; photovoltaic panels; CFD; wind tunnel.

1. Úvod

Vietor patrí medzi najdôležitejšie prírodné činitele pôsobiace na stavebné konštrukcie. Najviac ovplyvňuje strešné plášte a horné časti budov, kde sa jeho účinky prejavujú vo forme sania a dynamického zaťaženia. Moderné strechy dnes často plnia viacero funkcií – okrem ochrany slúžia ako priestor kde môžu užívatelia umiestniť fotovoltické systémy alebo ako pobytové a rekreačné zóny. Tieto funkcie však prinášajú aj vyššie aerodynamické nároky.

V mestskom prostredí, najmä v okolí výškových budov, sa často objavuje jav downwash, pri ktorom vietor prúdiaci po fasáde smeruje nadol a vytvára zosilnené zostupné prúdy. Tie spôsobujú zvýšené rýchlosti vetra pri teréne, čo negatívne ovplyvňuje veterný komfort a bezpečnosť.

Cieľom tohto článku je preto analyzovať aerodynamické javy na účelových strechách a osobitne sa zamerať na urbanistické plánovanie ako účinný nástroj na zníženie efektu downwash v mestskom prostredí.

2. Aerodynamické javy a riziká na účelových strechách

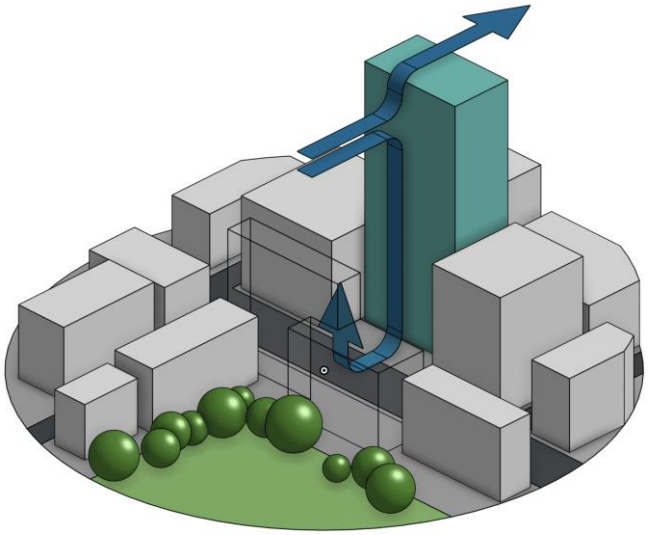
Zaťaženie vetrom sa prejavuje najviac na strechách. Strecha je najviac vystavená silám sania, ktoré vznikajú, keď vietor preteká okolo budovy. Pri prúdení okolo ostrých hrán a rohov sa tvoria víry, ktoré spôsobujú vysoké účinky sania. Čím má strecha menší sklon, tým sú účinky vetra silnejšie. [1][2].

2.1 Aerodynamické účinky a jeho lokalizácia

[1] Peter, Trudič, Ing., Stavebná fakulta, STU, KKPS, Radlinského 2766/11, 810 05 Staré Mesto, Slovensko

Z hľadiska aerodynamických účinkov sú najexponovanejšie sú spodné rohy a okrajové zóny strechy na náveterných stranách, kde vznikajú vysoké sacie (negatívne) tlaky. Preto musí byť strešná krytina a ostatné nenosné vrstvy, najmä na plochých strechách, v týchto miestach pevne zabezpečené [1][2].

V mestskom prostredí sa zároveň často prejavuje efekt downwash. Ide o jav, pri ktorom vietor naráža na fasádu vysokej budovy a je usmernený nadol smerom k úrovni terénu. Tým vznikajú zosilnené zostupné prúdy vzduchu, ktoré môžu výrazne zvýšiť rýchlosť vetra pri teréne. Tento jav zhoršuje veternú pohodu pre chodcov a užívateľov terás. Intenzita downwash efektu závisí od výšky a tvaru budovy, jej orientácie voči smeru vetra a hustoty zástavby v okolí [10].



Obr. 1 : 3D schéma znázorňujúca downwash efekt (zosilnenie vetra smerom nadol po fasáde) spôsobený vysokopodlažnou budovou). [9]

2.2 Dynamická odozva a kaskádové poruchy záťažových FV systémov

Osobitnú skupinu rizík predstavujú záťažové fotovoltické systémy, ktoré sa používajú najmä na plochých strechách budov, pretože nevyžadujú kotvenie do strešného plášťa a nenarúšajú hydroizoláciu. Ich návrh je však konštrukčne náročný, majú odlišné dynamické správanie ako mechanicky kotvené systémy.

Aerodynamické zaťaženie na týchto systémoch sa ďalej zvyšuje o približne 30% prostredníctvom faktora (DAF) vplyvom dynamickej odozvy, teda vibrácií panelov vyvolaných vetrom.

Pri záťažových systémoch zároveň najpravdepodobnejšie zlyhanie nevzniká posúvaním, ale zdvihnutím systému (vztlakom), pretože celková hmotnosť a trenie bránia vodorovnému pohybu. Okrem toho sa pozoruje kaskádový mechanizmus poruchy. Ten vzniká vtedy, keď vietor nadmerne zaťaží menšiu časť systému a spôsobí zdvihnutie jednej alebo viacerých podpier. Tým sa pod panelom vytvorí dutina, do ktorej sa dostane prúd vzduchu. To náhle zmení aerodynamické správanie a môže spôsobiť reťazovú reakciu, pri ktorej sa zdvihnú aj susedné panely a celý systém sa môže prevrátiť zo strechy [3][4][5].

Obr. 2 : Obrázok ktorý ukazuje, ako zdvihnutie jedného panelu vedie k reťazovej reakcii. [10]

2.3 Dynamické účinky vetra

Dynamické účinky vetra predstavujú situácie, keď sa rýchlosť a smer vetra rýchlo menia v čase (napr. krátkodobé makro- a mikrozáveje) čo spôsobujú výrazné. Dynamické účinky vetra sa nedajú priamo odvodiť zo stacionárnych výpočtov a môžu viesť k zvýšenému zaťaženiu, najmä na strechách s veľkým rozpätím, ako sú napríklad štadióny [2][6].

Zosilnenie zaťaženia sa prejavuje najmä v dolných častiach čiastočne otvorených striech s veľkým rozpätím, keď je čas nábehu vetra kratší ako približne 30 sekúnd. V týchto prípadoch sa zvýšenie koeficientu vztlaku nevytvára ako jeden výrazný „prudký sací bod“, ale ako rovnomerné zvýšenie sania na väčšej ploche strechy. Ide teda o celkové pôsobenie vetra na väčšiu časť konštrukcie, nie o lokálny extrém na jednom mieste. Tento proces nie je možné vysvetliť kvázistatickým modelom a predstavuje dynamickú odozvu strešnej konštrukcie na vietor [2][6].

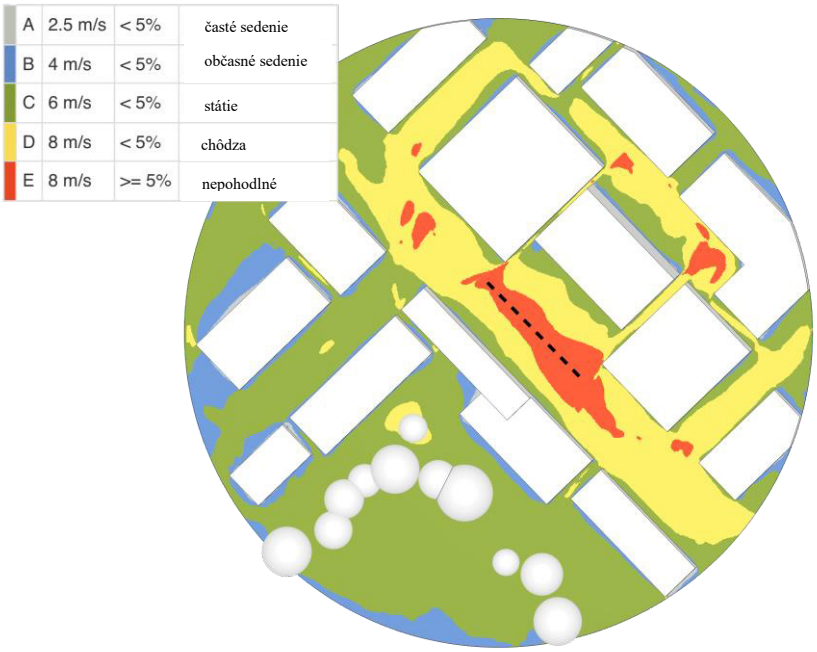
3. Analýza veternej pohody na pobytových strechách

Vplyv vetra na človeka v mestskom prostredí je zložitý. Strechy vysokých budov majú vhodné podmienky na umiestnenie energetických systémov, ako sú fotovoltické panely, ale zároveň môžu slúžiť aj ako pobytové zóny pre ľudí [1][7].

3.1 Kvantitatívne hodnotenie veterného komfortu

Diskomfort spôsobený vetrom v zónach pohybu neurčuje iba priemerná rýchlosť vetra vo výške približne 1,8 – 2 m nad povrchom, ale aj nárazové zložky vetra. Tie sú vyjadrené kolísaním rýchlosti vetra σ_v. Úroveň komfortu je možné vyjadriť parametrom Ψ, ktorý porovnáva priemernú rýchlosť vetra a mieru turbulencie v danej urbanistickej situácií so stavom bez vplyvu zástavby [1].

V praxi sa ukazuje, že husto zastavané územia s vysokými budovami často spôsobujú výrazný veterný diskomfort pre chodcov v okolí. Najviac problémové sú turbulentné víry v rohoch budov a zosilnené prúdy vetra na náveterných stranách, kde je vietor usmernený plochou fasády smerom nadol [1][7].

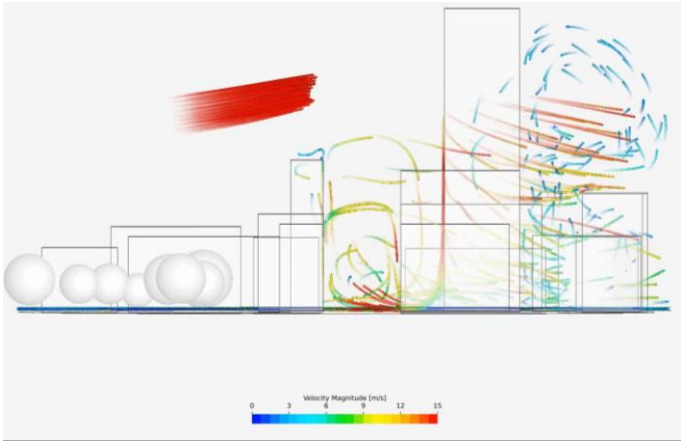


Obr. 3 : CFD mapa ukazujúca, kde downwash zhoršuje pohodlie chodcov. [9]

3.2 Návrhové odporúčania pre pobytové zóny

Hoci sa strechy často využívajú na fotovoltické alebo veterné systémy, ak majú slúžiť aj ako pobytové priestory, je potrebné uplatniť princípy na zníženie nežiaducich účinkov vetra. Nežiaduce prúdenie vetra v blízkosti vysokých budov možno znížiť použitím horizontálnych prístreškov, ako sú strešné prekrytia alebo systém „dáždnikov“. Účinné je aj použitie vetrových clôn, plotov alebo vegetačných pásov. Najlepšie výsledky dosahujú priepustné vegetačné clony s priepustnosťou približne 30 – 40 %, ktoré znižujú rýchlosť vetra plynulo a ich účinok sa prejavuje už v malej výške nad povrchom. Vegetácia by mala byť navrhnutá ako súvislý pás alebo masív, aby bol účinok stabilný [1][8].

V mestskom prostredí možno downwash efekt dobre identifikovať pomocou vizualizácií z CFD simulácií. Na obrázkoch, ktoré zobrazujú rýchlosť vetra v reze pri úpätí budovy, sú šípky znázorňujúce smer prúdenia vetra. Je viditeľné, ako vietor najprv naráža na fasádu budovy, potom je usmernený smerom nadol a následne sa šíri vodorovne pri úrovni terénu. Takáto grafická interpretácia jasne ukazuje smer a intenzitu prúdenia a pomáha pochopiť, kde môže dochádzať k zvýšenej rýchlosti vetra a nepohode pre chodcov. Tieto vizuálne údaje sú dôležité pri návrhu opatrení na zlepšenie veterného komfortu v okolí budov a na strešných pobytových terasách [9].



Obr. 4 : CFD animácia s prúdniciami vetra znázorňujúca efekt zostupného prúdenia (downwash). [9]

4 Veterný downwash ako výzva pre urbanistický návrh

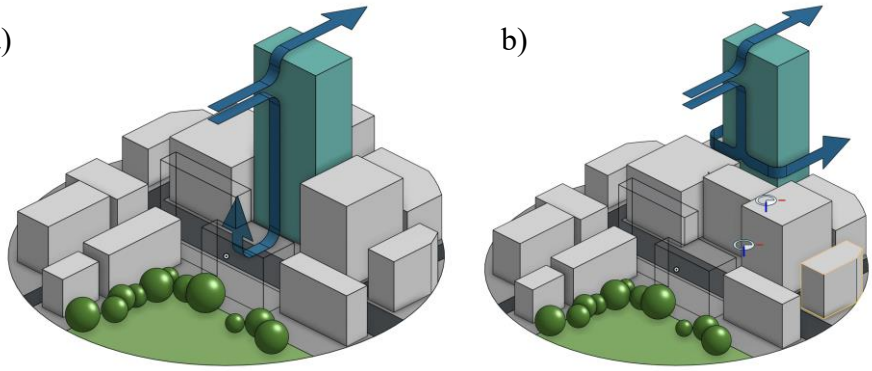
Pri riešení problému efektu downwash v mestách sa najčastejšie používajú dva osvedčené spôsoby – odklonenie vetra do vyšších častí budovy a zníženie jeho energie. Tieto spôsoby ponúkajú jednoduché a praktické riešenia pri navrhovaní vysokých budov, ktoré spôsobujú silné zostupné prúdy vetra [9].

Celkovo možno rozlíšiť päť hlavných stratégií na zmiernenie efektu downwash: 1. návrh budovy, 2. uličné konštrukcie, 3. krajinné úpravy a zeleň, 4. urbanistické plánovanie a 5. počítačové simulácie a veterné štúdie. V tomto článku sa podrobnejšie zameriam na štvrtú stratégiu – urbanistické plánovanie [9].

Urbanistické plánovanie je mimoriadne dôležité už v ranej fáze návrhu územia. Práve v tomto štádiu majú projektanti príležitosť riešiť veterný komfort už v procese návrhu mesta. Správnym umiestnením objektov môžu urbanisti ovplyvniť smer aj intenzitu prúdenia vetra v mestskej zástavbe. Kľúčovým faktorom je orientácia budov, aby poloha nezhoršovala veterné podmienky v úrovni chodcov [9].

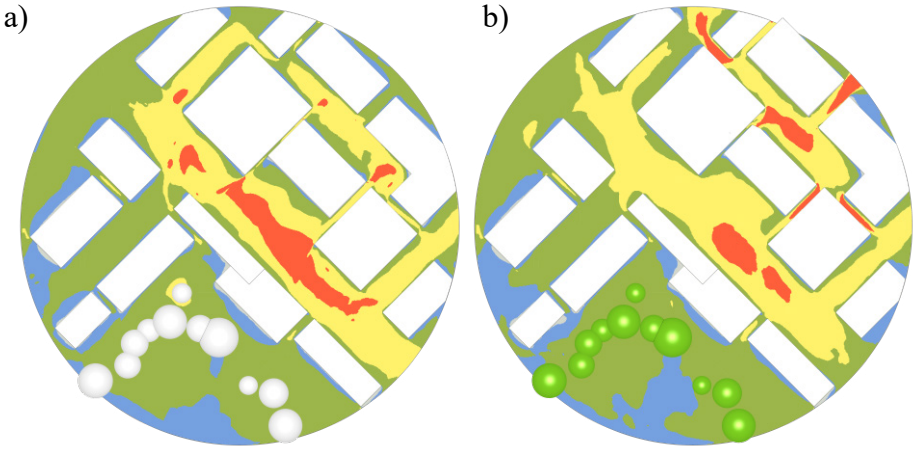
Rovnako dôležitú úlohu zohráva aj usporiadanie ulíc a otvorených priestorov. Ak ulice nie sú priamo zarovnané s hlavným smerom vetra, prúdenie sa prirodzene rozptyľuje, čím sa znižuje riziko vzniku silných zostupných prúdov. Zaradenie parkov, námestí či iných otvorených plôch umožňuje vetru postupne sa rozptýliť ešte predtým, než zasiahne zónu s peším pohybom [9].

a) b)

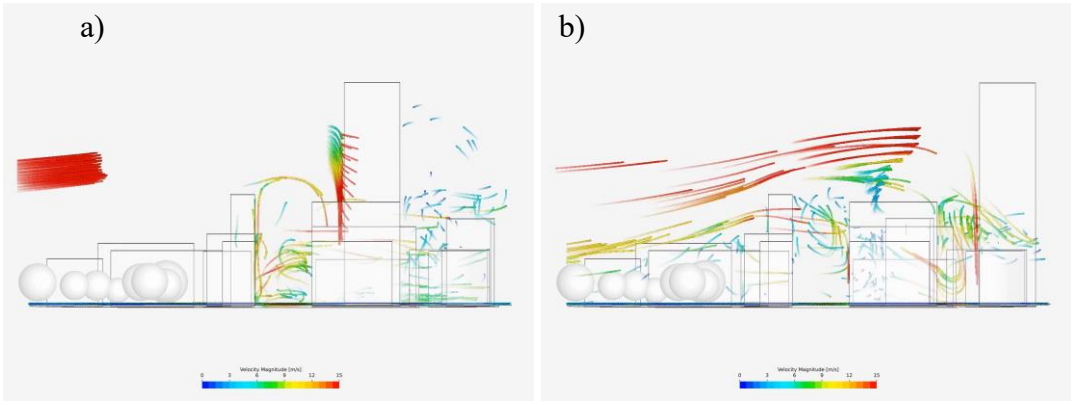


Obr. 5 : Základné urbanistické riešenie – veterná pohoda chodcov: (a) bez zohľadnenia urbanistických aspektov;(b) so zohľadnením urbanistických aspektov. [9]

Účinnosť strategického urbanistického plánovania pri zmierňovaní efektu downwash je dobre viditeľná na nasledujúcej sérii štyroch obrázkov vytvorených pomocou CFD simulácií. Simulácie porovnávajú dve situácie. Prvá, kde je budova na náveternom okraji uličného bloku, t.j. priamo vystavená prevládajúcemu vetru. Druhá, kde je tá istá budova na záveternej strane bloku, t.j. kde je chránená pred priamym prúdením. Horný rad obrázkov zobrazuje mapy komfortu chodcov, zatiaľ čo spodný rad ukazuje prúdnice vetra, ktoré ilustrujú samotný efekt downwash [9].



Obr. 6 : Základné urbanistické riešenie – veterná pohoda chodcov:(a) bez zohľadnenia urbanistických aspektov;(b) so zohľadnením urbanistických aspektov. [9]



Obr. 7 : Základné urbanistické riešenie – rýchlosť a smer vetra: (a) základné riešenie; (b) vylepšené riešenie. [9]

V prvej ukážke (základné urbanistické riešenie) nám simulácie ukazujú výrazný efekt downwash. Vietor bez prekážok naráža priamo na fasádu budovy a je smerovaný prudko nadol do úrovne chodcov, čo spôsobuje vysokú rýchlosť vetra v okolí ulice. Keď si pozrieme obr. 6, je jasne vidieť že vidieť rozsiahlu oblasť nepohodlia, ktorá ukazuje na intenzívny vplyv zostupného prúdenia [9].

V druhej ukážke (vylepšené riešenie), kde je budova umiestnená na záveternej strane, sa efekt downwash výrazne znižuje. Prúdnice ukazujú, že prúdenie vetra je rozptylnejšie a menej koncentrované, pretože budova je chránená pred priamym vetrom. Keď si pozrieme obr. 7, už môžeme vidieť menšie oblasti nepohodlia a lepší komfort pre chodcov [9].

Tieto porovnania jasne dokazujú, že ak sa pri počiatočnom urbanistickom návrhu zohľadňuje premyslené umiestnenie výškových budov má to potom výrazný vplyv na zníženie efektu downwash.

Ak sa pri plánovaní zohľadní smer prevládajúceho vetra a budovy sa strategicky rozmiestnia, je možné zlepšiť komfort aj bezpečnosť chodcov v mestskom prostredí [9].

5 Záver

Analýza ukazuje, že efekt downwash predstavuje významný aerodynamický problém v okolí výškových budov. Zosilnené zostupné prúdy vetra môžu spôsobovať zvýšené sanie na stenách, veterný diskomfort chodcov aj nepriaznivé dynamické zaťaženie na technických systémoch.

Ukázalo sa, že premyslené urbanistické plánovanie je jednou z najúčinnejších spôsobov na zmiernenie týchto javov. Správne umiestnenie budov, ich orientácia voči smeru vetra, ako aj vhodné usporiadanie ulíc a otvorených priestorov, umožňujú vetru prirodzene sa rozptýliť a znižujú vznik silných zostupných prúdov.

Použitie CFD simulácií v procese návrhu umožňuje tieto účinky predvídať a optimalizovať už v počiatočných fázach projektovania. Tým sa zvyšuje bezpečnosť, komfort a udržateľnosť mestských štruktúr. Prepojenie architektúry, aerodynamiky a urbanizmu je kľúčom k návrhu moderných a odolných miest budúcnosti.

Literatúra

[1] BIELEK, B.; FRANEK, M.; BIELEK, M. *Aerodynamika a hydrodynamika budov: Fyzikálne problémy účinku vetra a hnaného dažďa na budovy a konštrukcie.* Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2020. 285 s. ISBN 978-80-227-5051-6

[2] TAMURA, Y.; KAREEM, A. (eds.): *Advanced Structural Wind Engineering*. Springer [online]. Tokyo: Springer, 2013. 1150 s. [cit. 26.09.2025]. ISBN 978-4-431-54336-7. Dostupné na: https://link.springer.com/book/10.1007/978-4-431-54337-4

[3] INSTITUT FÜR INDUSTRIEAERODYNAMIK (IFI): *Wind Loads on the "S-Dome 6.10" and "S-Dome 6.15" Solar Ballasted Roof-Mount Systems of K2 Systems GmbH — Design wind loads per ASCE 7 & EN 1991-1-4*. IFI [online]. Aachen: IFI, 2023. 34 s. [cit. 26.09.2025]. Dostupné na: https://catalogue.k2-systems.com/media/da/19/aa/KSR04-11-1_S-Dome%206.10_6.15_short%20report.pdf

[4] SINGLE PLY ROOFING INDUSTRY (SPRI): *ANSI/SPRI RP-14 — Wind Design Standard for Vegetative Roofing Systems*. SPRI [online]. Walnut Creek: SPRI, 2016. 28 s. [cit. 26.09.2025]. Dostupné na: https://www.spri.org/wpfb-file/ansi-spri-rp-14-2022-wind-design-standard-for-vegetative-roofing-systems-pdf/

[5] STN EN 1991-1-4: *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions*. SÚTN [online]. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie, 2007. 96 s. [cit. 26.09.2025]. Dostupné na: https://www.sutn.sk (prístup môže byť obmedzený podľa licencie).

[6] CHENG, X.-X.; JIANG, K.; LI, Q.; et al.: *Full-Scale/Model Test Comparisons to Validate the Traditional ABL Wind Tunnel Tests: Literature Review and Personal Perspectives*. Applied Sciences [online]. Basel: MDPI, 2024, roč. 14, č. 2, 782, 26 s. [cit. 26.09.2025]. ISSN 2076-3417. Dostupné na: https://doi.org/10.3390/app14020782

[7] RWDI: *3275 Trafalgar Road, Oakville ON – Pedestrian Wind Comfort Assessment*. RWDI [online]. Guelph: RWDI Consulting Engineers and Scientists, 2024. **57 s.** [cit. 26.09.2025]. Dostupné na: https://rwdi.com

[8] HOSSEINZADEH, A.; BOTTACIN-BUSOLIN, A.; KESHMIRI, A.: *A Parametric Study on the Effects of Green Roofs, Green Walls and Trees on Air Quality, Temperature and Velocity*. Buildings [online]. Basel: MDPI, 2022, roč. 12, č. 10, 2159, 23 s. [cit. 26.09.2025]. ISSN 2075-5309. Dostupné na: https://www.mdpi.com/2075-5309/12/10/2159

[9] SimScale. *3D schematic showing the downwash effect caused by a high-rising building*. In: "Building Downwash: 5 Key Strategies to Counteract Urban Wind Discomfort" [online]. Updated 17. April 2024. [cit. 26.09.2025]. Dostupné z: https://www.simscale.com/blog/building-downwash-mitigation-strategies/

[10] KHAN, A. K.; SHAH, T. R.; KHOSA, A. A.; ALI, H. M.: *Evaluation of wind load effects on solar panel support frame: A numerical study*. Engineering Analysis with Boundary Elements [online]. Amsterdam: Elsevier, 2023, roč. 153, s. 88–101. [cit. 26.09.2025]. ISSN 0955-7997. Dostupné na: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955799723002540

THEORY AND STRUCTURES OF CIVIL ENGINEERING WORKS

Dárius Bálint[1]
Študijný program: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 2.ročník:

NÁVRH EXPERIMENTÁLNEHO NOSNÍKA VYSTUŽENÉHO GFRP VÝSTUŽOU SO ZAMERANÍM NA ŠMYKOVÚ ODOLNOSŤ

DESIGN OF AN EXPERIMENTAL BEAM REINFORCED WITH GFRP REINFORCEMENT WITH A FOCUS ON SHEAR RESISTANCE

Abstract

The viability of employing a substitute for conventional steel reinforcement in concrete structures is investigated in this study. When the concrete cover is removed, stirrups are the first parts to degrade. damaged by carbonation, thus this use is suitable for bridges exposed to hard conditions when de-icing salt chlorides are present. Because they are so close to the surface, stirrups are the first parts to corrode. The shear behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite reinforcement is examined analytically in this work. The tested beam, which is reinforced with GFRP longitudinal bars and GFRP stirrups, is loaded at a postion 3d from the support and is stressed to shear failure at the critical location.

Kľúčové slová / Key Words
GFRP strmene, navrhovanie GFRP výstuže na šmyk, šmyková odolnosť

1. Úvod

Betónové prvky sa čoraz častejšie vystužujú polymérmi vystuženými vláknami (FRP), najmä v oblastiach, kde korózia negatívne ovplyvňuje výstuž. Z tohto dôvodu je vhodné prehodnotiť použitie oceľovej výstuže oproti kompozitnej výstuži, najmä ak sú konštrukcie vystavené agresívnemu prostrediu [8].

Zatiaľ čo problematika ohybovej odolnosti betónových prvkov vystužených FRP výstužami je pomerne dobre preskúmaná, otázka šmykovej odolnosti zostáva predmetom intenzívneho výskumu. Na rozdiel od oceľovej výstuže má GFRP výstuž lineárne elastické správanie až do porušenia, bez medze klzu, čo zásadne ovplyvňuje mechanizmus prenosu šmyku a správanie strmeňov. GFRP strmene pri pôsobení šmykových síl neplastizujú, ale pracujú v pružnej oblasti až do náhleho porušenia, čo vedie k odlišnému priebehu porušenia nosníka a menšej rezerve v odolnosti. Norma ACI 440.11 povoľuje z FRP materiálov iba kompozitné materiály zo sklenených vlákien . Druhá generácia Eurokódu 2 povoľuje použitie GFRP výstuže, hoci sa môže použiť v spojení s oceľovou výstužou ako pomocná alebo doplnková výstuž.

Výpočet šmykovej odolnosti betónových nosníkov so šmykovou výstužou z GFRP sa v súčasnosti opiera o viacero návrhových prístupov a odporúčaní uvedených v zahraničných normách. Medzi najpoužívanejšie patria ACI 440.1R-15 [10] (Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars), CSA S806-12 [11] (Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers), CNR-DT 203/2006 [9] (Guide for the Design and Construction of Concrete Structures) ako aj európske dokumenty fib Bulletin 40 a fib Model Code 2020. Tieto návrhové predpisy sa usilujú zohľadniť špecifiká prenosu šmyku v

[1] Dárius, Bálint, Ing. , Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovensko

konštrukciách vystužených FRP materiálmi, pričom každý z nich využíva odlišný prístup k stanoveniu príspevku betónu a výstuže k celkovej šmykovej odolnosti.

2. Súčasný stav problematiky

Návrh železobetónu sa opiera o teóriu plasticity, ktorá umožňuje rovnovážny stav bez zohľadnenia kompatibility. Nakoľko FRP výstuž majú lineárny priebeh diagramu σ-ε nie je možné použitie zjednodušenej priehradovej analógie pre určenie šmykovej odolnosti ako pri oceľovej výstuži. Teória plasticity je založená na prerozdelení napätí v priereze. Ak sa v betóne použije výstuž, ktorá má krehký charakter porušenia , ako napríklad FRP (vláknami vystužený polymér), teóriu plasticity nie je možné použiť. Z tohto dôvodu sa vykonávajú rôzne experimentálne merania, aby sa dala čo najpresnejšie predpokladať šmyková odolnosť prvku vystuženého šmykovou výstužou z GFRP.

Vo svete sú štúdie, ktoré sa zamerali na využitie GFRP výstuží vo forme strmeňov. Jednou z nich je výskum Bertolli a kol. [1]. Bertolli sa venoval overovaniu šmykovej a ohybovej odolnosti, kde použili rôzne varianty GFRP výstuže so strmeňmi. Zistili, že ako aktuálna, tak aj pripravovaná talianska smernica CNR-DT 203[9], majú tendenciu nadhodnocovať šmykovú odolnosť nosníkov vystužených strmeňmi z GFRP. Normy ACI CODE-440.11–22 [10], CSA S806–12 [11] a EN 1992–1–1:2023 [12] poskytli presnejšie predpovede šmykovej odolnosti v porovnaní s výsledkami experimentov. Prístup vo francúzskej norme AFGC [13] je výrazne ovplyvnený sklonom tlakovej diagonály θ, ktorý sa berie do úvahy pri výpočte šmykovej odolnosti.

Ďalšiu rozsiahlu štúdiu robili Issa, M. A a kol. [2]. V tejto experimentálnej štúdii sa zamerali primárne na vplyv vzájomnej vzdialenosti šmykovej výstuže z GFRP spolu s pozdĺžnou výstužou z GFRP na vznik trhlín v nosníku. Skúmali šmykovú odolnosť takéhoto nosníka a zároveň vplyv GFRP strmeňov na vznik trhlín. V experimente použili tri vzájomné vzdialenosti strmeňov 50mm, 75mm a 100mm. Výsledky porovnávali s normou ACI CODE-440.11–22 [10]. V štúdii zistili, že vzájomná vzdialenosť strmeňov menšia ako jedna tretina účinnej výšky prierezu (d/3) výrazne nezvyšuje odolnosť nosníka vystuženého len GFRP výstužou. Avšak, keď je vzájomná vzdialenosť strmeňov z GFRP rovná d/4, mení sa spôsob porušenia z kombinácie ohybu a šmyku na zlyhanie výstuže v ohybe alebo drvenie betónu v tlačenej oblasti pri ohybe. Výsledky naznačujú, že ACI CODE-440.11-22 [10] má tendenciu nadhodnocovať šmykovú odolnosť šmykovej výstuže z GFRP, najmä keď je vzájomná vzdialenosť strmeňov z GFRP rovná alebo menšia ako jedna tretina účinnej výšky prierezu (d/3). Nosníky vystužené GFRP bežne vykazujú širšie šírky trhlín. Keď sú nosníky vystužené GFRP vystavené prevádzkovému zaťaženiu, šírka trhlín má tendenciu sa zmenšovať so zmenšovaním vzájomnej vzdialenosti strmeňov. Toto pozorovanie zdôrazňuje významný vplyv stupňa vystuženia šmykovej výstuže na šírku trhlín v nosníkoch vystužených oceľovou a GFRP výstužou. Výsledky skúšok jasne ukazujú, že indexy duktility priehybu (pomer priehybu pri vzniku prvej trhline ku priehybu pri porušení) sa zvyšujú, najmä keď sa vzájomná vzdialenosť strmeňov GFRP v rámci svetlého rozpätia nachádza medzi účinnou výškou prierezu (d') a polovicou účinnej výšky prierezu (d/2). Okrem toho sa odporúča, aby bola vzájomná vzdialenosť strmeňov v poli väčšia ako v šmykovej oblasti, aby sa zvýšila duktilita prvku.

V štúdii Said, M a kol. [3] sa zamerali na predikciu šmykovej odolnosti nosníka vystuženého len s GFRP výstužou, ktorý porovnávali s nosníkom bez šmykovej výstuže. Túto predikciu vypracovali v programe ANSYS a následne ju vyhodnocovali s experimentom a dostupnými normami a smernicami. Pri analyzovaní experimentu došlo k zvýšeniu šmykovej odolnosti o 41% pri použití šmykovej výstuže priemeru 8 mm po 215 mm (d/1,2) a o 82% pri použití priemeru 8 mm po 100 mm (d/2,55). Tieto hodnoty boli porovnané so šmykovou odolnosťou nosníka bez šmykovej výstuže.

Rovnice pre šmykovú odolnosť podľa ACI 440.1R [10] priniesli oveľa lepšie výsledky ako smernice CAN/CSA-S806 [11], ISIS No. 03 a JSCE. Smernica JSCE bola nadmerne konzervatívna s V_{exp}/V_{pred} 2,9. ACI 440.1R-06 [10] priniesla rozumnejší, ale stále príliš konzervatívny výsledok s V_{exp}/V_{pred}2,1. Model NLFEA presne predpovedal odozvu nosníka vystuženého GFRP. Aplikácia nelineárneho modelu konečných prvkov priniesla podobné hodnoty zaťaženia pri vzniku trhlín, odolnosti a deformácii. Výsledky NLFEA a výpočty STM priniesli pomerne presnú predpoveď šmykovej odolnosti skúšaných nosníkov s V_{exp}/V_{pred} 0,9 a 1,2.

Vo výskume autorov Krall, M. a Polak, M. A[4], bolo hlavným cieľom zamerať sa na účinnosť GFRP výstuže v podobe strmeňov. Nosníky s rovnakou vzájomnou vzdialenosťou šmykovej výstuže, pri rôznom stupni vystuženia pozdĺžnej výstuže, zlyhali v šmyku pri podobných hodnotách zaťaženia. Experimentálne výsledky, pri porovnaní s optimalizovanými rovnicami pre šmykovú odolnosť podľa Nehdiho a kol., majú tendenciu potvrdzovať, že šmyková odolnosť nosníka sa zvyšuje so stupňom vystuženia pozdĺžnej aj šmykovej výstuže. Strmene v blízkosti podpery, kde je vývoj šírky trhlín najväčší, vykazovali nosníky najväčšie šmykové napätia. Zo vzorky boli vybraté dva strmene, na ktorých boli viditeľné trhliny pozdĺž osi strmeňa.

Nízkym a širokým nosníkom sa venovala štúdia Erfan, A. M a kol. [5], kde analyzovali viac strižne vystužené nosníky GFRP strmeňmi a ich kombináciou s oceľovými strmeňmi. Taktiež v ich experimente skúmali alternatívu zvýšenia šmykovej odolnosti prierezu pridaním oceľových vlákien do čerstvého betónu. Zmenšenie vzájomných vzdialeností z 200 mm (d/0,8) na 125 mm (d/1,27) zvýšilo šmykovú odolnosť o 29 % v porovnaní s referenčnou vzorkou. Pridanie oceľových vlákien do betónovej zmesi v objemovom podiele 1,5 % a 3 % tiež zvýšilo šmykovú odolnosť o 9 %, resp. a 24 % , v porovnaní s referenčnou vzorkou. Pridanie oceľových vlákien eliminovalo vznik trhlín v šmykových a ohybových oblastiach, prerozdelilo maximálne napätie z vnútorných na vonkajšie vetvy strmeňov v SWB a zlepšilo ťažnosť.

Vo výskume Shi, W. H a kol. [6] bolo skúšaných jedenásť nosníkov vystužených GFRP výstužou na zisťovanie šmykových odolností so zameraním na vplyv použitej matrice, typu strmeňov, stupeň vystuženia šmykovou výstužou a vzájomnú vzdialenosť šmykovej výstuže. Okrem toho navrhli metódu na predikciu šmykovej odolnosti a priehybu nosníkov vysokohodnotným cementovým kompozitom (ECC). Jedná sa o nosníky s ECC, ktoré obsahujú polyvinylalkoholové vlákna, ktoré výrazne zlepšujú jeho ťažnosť a odolnosť proti trhlinám. ECC výrazne zlepšilo šmykovú odolnosť a deformáciu nosníkov vystužených GFRP efektívnym zabránením rozvoja šmykovej deformácie a zlepšením šmykového príspevku strmeňov. Šmyková odolnosť nosníkov sa zvyšovala s nárastom stupňa vystuženia pozdĺžnou a šmykovou. Šmykový pomer bol hlavným faktorom ovplyvňujúcim šmykovú odolnosť a priehyb nosníkov z ECC. Nosníky ECC vykazovali viac mikrotrhlín, čo naznačuje vynikajúcu schopnosť kontroly trhlín. V porovnaní s betónovými nosníkmi mali nosníky ECC šírku trhlín obmedzenú na menej ako 0,5 mm.

V štúdii Zhao, J.a kol. [7] sa skúmalo správanie betónových nosníkov vystužených GFRP strmeňmi v šmyku a analyzovala sa deformácia. Medzi šmykovou silou a priehybom v strede rozpätia existuje lineárna závislosť. Pomer šmykového rozpätia k účinnej výške λ má významný vplyv na šmykovú deformáciu nosníkov a zvýšenie λ znižuje tuhosť nosníka. V porovnaní s λ má vzdialenosť strmeňov S menší vplyv na maximálne zaťaženie nosníka a ak je vzdialenosť strmeňov veľká (S = 200 mm - d/2), tuhosť vzorky sa v neskoršej fáze zaťaženia znížila. Pomer šmykového rozpätia k účinnej výške λ je dôležitým faktorom ovplyvňujúcim šmykovú odolnosť a spôsob porušenia nosníkov. Ak sa λ zvýši z 1 na 2, 3, resp. 4, šmyková odolnosť nosníka sa zníži o 50,5 %, 67,7 %, resp. 69,2 %. Ak sa λ zvýši z 1 na 2, resp. 3, tak sa spôsob porušenia zmení z drvenia betónu tlakovej diagonály na zlyhanie drvením betónu v tlačenej oblasti a šikmej trhline (šmykové porušenie).

3. Navrhovaný experimentálny program

3.1 Popis experimentu

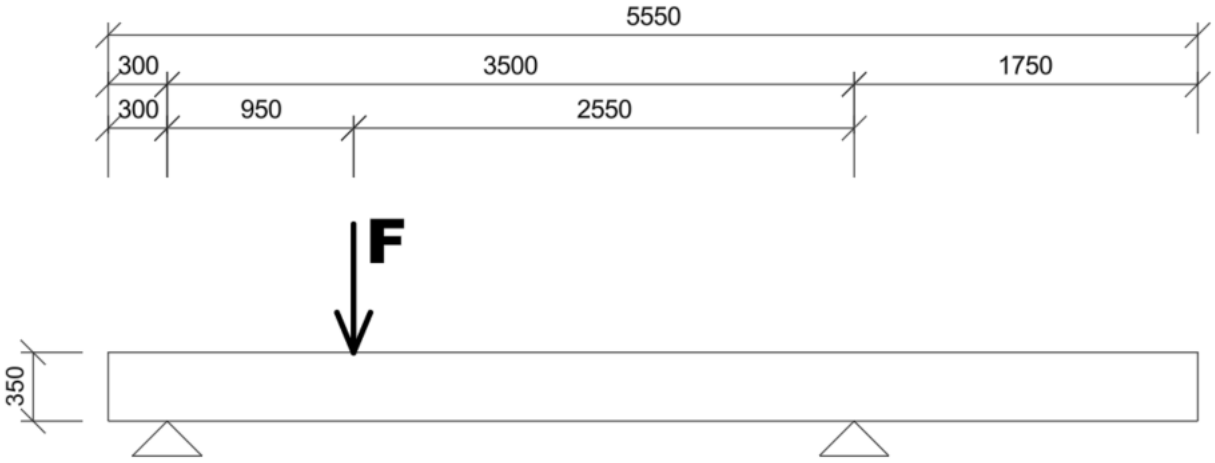
Experiment bude zameraný na stanovenie šmykovej odolnosti betónového nosníka so šmykovou výstužou z GFRP strmeňov. Experimentálne meranie bude prebiehať v laboratórnych podmienkach na proste podopretom nosníku s dĺžkou 5550 mm a prierezom 250 x 350 mm. Každý nosník bude skúšaný dvakrát, s účinnou dĺžkou nosníka 3500 mm. Nosník je navrhnutý z betónu triedy C30/37, preto v predbežnom výpočte bude uvažovaná stredná hodnota pevnosti betónu v tlaku $f_{cm} = 38$ MPa. Ako pozdĺžna výstuž budú použité štyri GFRP prúty priemeru Ø16 mm v spodnom rade a v druhom rade budú pridané ďalšie dva prúty kvôli dostatočnej rezerve ohybovej odolnosti, uložené v ťahovej oblasti pri spodnom okraji prierezu. Pri hornom okraju budú 2 prúty priemeru 12 mm.

Priečna výstuž bude tvorená GFRP strmeňmi, priemeru Ø8 mm po 100,150,200 mm v časti so zvýšeným šmykovým namáhaním do vzdialenosti 900mm (3d) od teoretickej podpery.

Vo výpočte bude uvažované s plnou pevnosťou v ťahu pozdĺžnej výstuže bez redukčných súčiniteľov z dôvodu krátkodobej skúšky. Strmene budú tvarované pultruovaním do požadovaného tvaru. Pre zistenie pevnosti strmeňa v ohybe budú zrealizované materiálové skúšky na nezabetónovaných strmeňoch. V rámci predbežných výpočtov bola uvažovaná pre pozdĺžnu aj šmykovú GFRP výstuž pevnosť v ťahu $f_{fu} = 900$ MPa a modul pružnosti $E_f = 50$ GPa

Pre porovnanie bude skúšaný aj referenčný nosník so strmeňmi z ocele Ø8 mm a pozdĺžnou výstužou z GFRP priemeru Ø16 mm, aby bolo možné vyhodnotiť rozdiel v správaní pri šmykovom namáhaní. Následne bude overovaný vplyv vzájomnej vzdialenosti strmeňov z GFRP na šmykovú odolnosť.

Skúška bude vykonaná ako statická zaťažovacia skúška s jednobodovým zaťažením, pričom vzdialenosť medzi pôsobiacou silou a podperou bude 3d, čo je v našom prípade 950 mm.



Obr. 1: Schéma nosníka

3.2 Predbežný výpočet odolností podľa predpisov a noriem

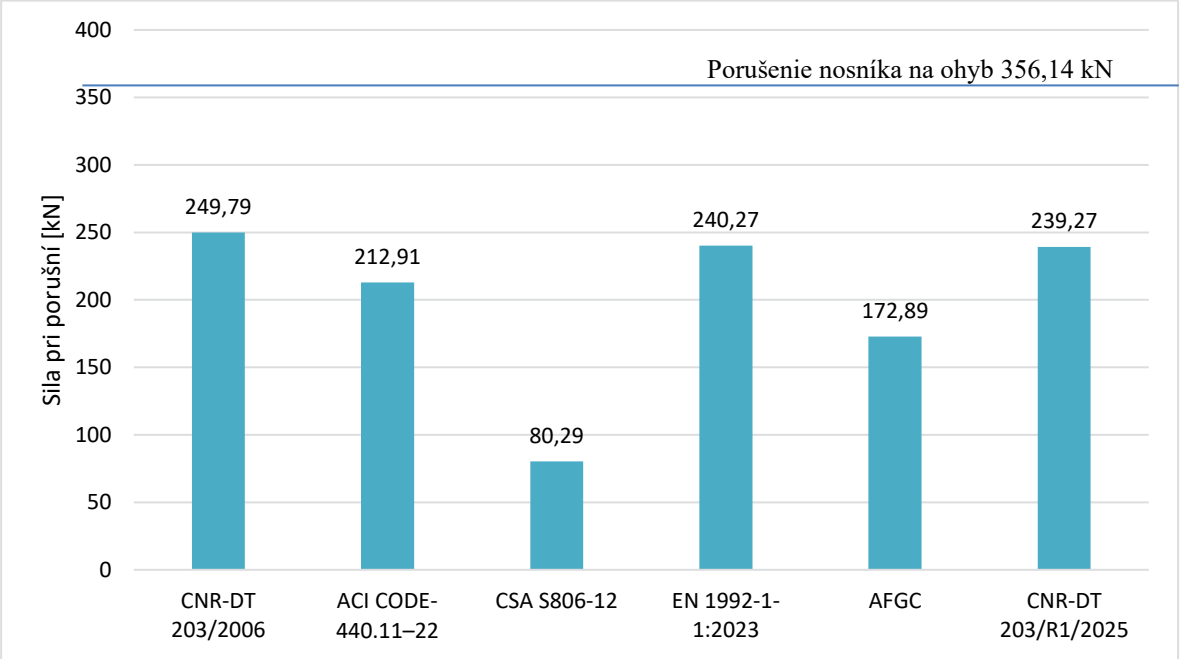
V tejto časti analýzy bol vykonaný porovnávací prepočet šmykovej odolnosti betónových nosníkov vystužených uzavretými GFRP strmeňmi podľa dostupných výpočtových postupov vychádzajúcich z odporúčaní a ustanovení uvedených v príslušných normách a smerniciach. Do porovnania boli zahrnuté najvýznamnejšie predpisy, ktoré sa problematikou šmykovej odolnosti konštrukcií s FRP výstužou podrobne zaoberajú – talianska norma CNR-DT 203/2006 [9], americká

ACI 440.11–22 [10], kanadská CSA S806–12 [11], druhá generácia Eurokódu 2 (EN 1992–1–1:2023 [12]), francúzska smernica AFGC; 2023 [13] a nové talianske znenie CNR-DT 203/R1/2025 [14]. Vo väčšine analyzovaných noriem, s výnimkou francúzskej AFGC, sa nominálna šmyková odolnosť vystuženého betónového prierezu V_n určuje ako súčet príspevku betónu V_c a príspevku GFRP výstuže V_f. Francúzska norma sa od tohto prístupu odlišuje tým, že príspevok betónu na prenose šmyku zanedbáva a celková šmyková únosnosť sa tak odvodzuje výlučne z účinku kompozitnej výstuže.

V nasledujúcej tabuľke 1 sú zhrnuté výsledky výpočtu šmykovej odolnosti skúmaného nosníka podľa jednotlivých návrhových predpisov. Uvedené sú čiastkové príspevky betónu V_c a GFRP strmeňov V_f, ako aj ich súčet – nominálna šmyková odolnosť prierezu V_n. Uvedené čiastkové odolnosti boli dopočítané bez redukčných súčiniteľov pre dlhodobú pevnosť GFRP z dôvodu krátkodobého zaťaženia.

Tab. 1: Porovnanie výsledkov vypočítaných podľa dostupných noriem

	V_c	V_f	V_n
	[kN]	[kN]	[kN]
CNR-DT 203/2006	57,69	192,10	249,79
ACI CODE-440.11–22	20,80	192,10	212,91
CSA S806-12	11,14	69,16	80,29
EN 1992-1-1:2023	67,37	172,89	240,27
AFGC	-	172,89	172,89
CNR-DT 203/R1/2025	66,38	172,89	239,27



Obr. 2: Grafické znázornenie predpokladanej sily pri porušení

Z porovnania výsledkov v tab.1 vyplýva, že jednotlivé normy poskytujú pomerne odlišné hodnoty šmykovej odolnosti, čo je dôsledkom rozdielneho prístupu k zahrnutiu príspevku betónu V_c a k určeniu účinnosti GFRP výstuže V_f. Najvyššiu šmykovú odolnosť predpovedá talianska norma CNR-DT 203/2006 (249,79 kN) [9], zatiaľ čo najkonzervatívnejší výsledok poskytuje kanadská CSA S806–12 (80,29 kN) [11]. Francúzska smernica AFGC (2023) [13] sa od ostatných noriem odlišuje

tým, že nezohľadňuje príspevok betónu V_c, a preto poskytuje hodnotu V_n totožnú s príspevkom GFRP výstuže $V_f = 172{,}89kN$. Novšie talianske znenie CNR-DT 203/R1/2025[14] prináša výsledky veľmi blízke 2. generácii Eurokódu 2 (EN 1992–1–1:2023) [12], čo potvrdzuje zbližovanie návrhových prístupov v európskom prostredí. Všetky hodnoty sa nachádzajú výrazne pod hodnotou porušenia nosníka na ohyb. Z obr.2 je predpoklad, že experimentálny nosník má výraznú rezervu v porušení na ohyb a malo by nastať porušenie nosníka na šmyk.

4. Záver

Použitie GFRP výstuže, a najmä strmeňov, predstavuje efektívne riešenie problému korózie v betónových konštrukciách vystavených agresívnemu prostrediu. Ako však ukázal prehľad súčasného stavu poznania, presná predikcia šmykovej odolnosti takýchto prvkov zostáva výzvou. Krehké, lineárno-elastické správanie GFRP materiálov až do porušenia nie je adekvátne zachytené v tradičných modeloch založených na plastizácii ocele, čo vedie k výrazným rozdielom v prístupoch jednotlivých návrhových noriem.

Prezentované štúdie [1-7] odhalili, že faktory ako vzájomná vzdialenosť strmeňov, stupeň vystuženia pozdĺžnej výstuže, či vlastnosti betónu majú zásadný vplyv na mechanizmus porušenia. Analýza tiež potvrdila, že zatiaľ čo niektoré predpisy (napr. CSA S806-12[10]) poskytujú skôr konzervatívne výsledky, iné (napr. staršie verzie CNR[9]) majú tendenciu šmykovú odolnosť nadhodnocovať. Predbežné výpočty pre navrhovaný experiment, zhrnuté v Tabuľke 1, tieto nezrovnalosti jasne demonštrujú.

Plánovaný experiment, ktorý bude priamo porovnávať nosníky s GFRP strmeňmi, oceľovými strmeňmi a ich kombináciou, poskytne nevyhnutné dáta na určenie, ktorý z normových prístupov najpresnejšie odráža skutočné správanie. Cieľom je prispieť k vývoju spoľahlivejších a bezpečnejších návrhových metodík, ktoré umožnia širšie a efektívnejšie uplatnenie GFRP kompozitov v stavebnej praxi.

Poďakovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-23-0193 a s podporou výskumného projektu VEGA č. VEGA 1/0144/23 "Overenie spoľahlivosti nelineárnych metód európskych noriem a návrhové modely nosných prvkov pre nemetalické G-FRP výstuže vyrábané na Slovensku“.

Literatúra

[1] BERTOLLI, V., Pisani, M. A., & D’Antino, T. (2025). Use of thermoset- and thermoplastic-resin GFRP bars as internal flexural and shear reinforcement of concrete beams. *Engineering Structures*, *343*. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120986

[2] ISSA, M. A., Allawi, A. A., & Oukaili, N. (2024). Effects of GFRP Stirrup Spacing on the Behavior of Doubly GFRP-Reinforced Concrete Beams. *Civil Engineering Journal (Iran)*, *10*(2), 502–520. https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-02-011

[3] SAID, M., Adam, M. A., Mahmoud, A. A., & Shanour, A. S. (2016). Experimental and analytical shear evaluation of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars. *Construction and Building Materials*, *102*, 574–591. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.185

[4] KRALL, M., & Polak, M. A. (2019). Concrete beams with different arrangements of GFRP flexural and shear reinforcement. *Engineering Structures*, *198*. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109333

[5] ERFAN, A. M., Shanour, A. S., El-Romy, A., & Badawy, M. M. (2025). Shear behavior of fibrous concrete shallow wide beams using GFRP shear reinforcement. *Structures*, *71*. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108120

[6] SHI, W. H., Qian, L. P., Bai, Y. L., Liu, S. Z., & Zhang, Y. (2025). Experimental study on shear behavior of ECC beams reinforced with GFRP bars. *Structures*, *78*. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109306

[7] ZHAO, J., Bao, X., Yang, S., Wang, Z., He, H., & Xu, X. (2024). Experimental and Theoretical Studies on the Shear Performance of Concrete Beams Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Stirrups. *Materials*, *17*(3). https://doi.org/10.3390/ma17030593

[8] Y.A. Al-SALLOUM, S. El-Gamal, T.H. Almusallam, S.H. Alsayed, M. Aqel, Effect of harsh environmental conditions on the tensile properties of GFRP bars, Compos. B Eng. 45 (1) (2013) 835–844.

[9] National Research Council. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. CNR-DT 203/2006. Rome, Italy: CNR; 2007.

[10] ACI Committee 440. Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars—Code and Commentary. ACI CODE-440.11-22. Farmington Hills, 48331 MI: ACI; 2023.

[11] Canadian Standards Association (CSA). Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. CAN/CSA S806-12. Mississauga, ON, Canada: Canadian Standards Association (CSA); 2021.

[12] European Committee for Standardization. Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. EN 1992-1-1:2023 E. Brussels, Belgium: CEN-CENELEC; 2023.

[13] AFGC. Recommendations for the use of FRP (Fibre Reinforced Polymer) rebars for reinforced concrete structures. AFGC; 2023.

[14] National Research Council. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. CNR-DT 203/R1/2025. Rome, Italy: CNR; 2025.

Daniel Beutelhauser[1]
Študijný program: D-TKeIS4, ročník: 4.

PARAMETRICKÁ ANALÝZA DYNAMICKÉHO SPRÁVANIA OBOJSMERNE NOSNEJ ŽELEZOBETÓNOVEJ DOSKY

Parametric Analysis of Dynamic Behavior of Two-Way Reinforced Concrete Slab

Abstract
With the increasing demand for sustainable structural designs, voided reinforced concrete slabs may represent a promising solution due to their reduced material consumption and enhanced structural performance, when compared to full cross-section slabs. However, they also pose some challenges in terms of design, one of which is their dynamic behavior, which is being investigated in this case study.
To better understand the behavior of the voided reinforced concrete slab, a dynamic measurement has been performed. Results of this measurement were compared to results of a finite element analysis and then the model has been verified and validated, based on obtained results.

Kľúčové slová / Key Words
Vyľahčená stropná doska, dynamické správanie, ľuďmi vyvolané budenie / voided slab, dynamic behavior, human induced excitation.

1. Úvod

Znižovanie spotreby materiálov a optimalizácia stavebných prvkov prispievajú k rozvoju inovatívnych prístupov aj v oblasti stavebníctva. Súčasne rastie význam ekologických aspektov výstavby, najmä potreba redukcie uhlíkovej stopy, čo ovplyvňuje aj spôsob výroby stavebných materiálov [1]. Príkladom jedného z prístupov, ktorý tieto požiadavky reflektuje, je minimalizácia spotreby betónu s pomocou použitia vyľahčených stropných konštrukcií.

Technológia stropných dosiek s vloženými dutými, resp. málo hustými telesami nie je úplne nová – ich statické vlastnosti sú predmetom výskumu už dlhší čas, pričom táto téma je stále aktuálna a riešená [2–4]. Tento príspevok sa venuje dynamickému správaniu železobetónových vyľahčených stropných dosiek, ktoré sú navrhnuté ako nosné v dvoch smeroch. Hlavným cieľom je výpočet vlastných tvarov a frekvencií, ktoré sú v praxi potrebné pre vyhodnotenie medzného stavu používateľnosti konštrukcie. Toto posúdenie je obzvlášť dôležité v budovách, ako sú laboratóriá alebo zdravotnícke zariadenia, kde vibrácie môžu negatívne ovplyvniť činnosť citlivých prístrojov [5]. Aj v administratívnych alebo obytných budovách je však nevyhnutné porozumieť dynamickej odozve stropných systémov, pretože výrazne ovplyvňuje komfort používateľov [6].

Z tohto dôvodu je nevyhnutné, aby boli dynamické charakteristiky vyľahčených dosiek zohľadnené už počas návrhu konštrukcie. K dispozícii je viacero výpočtových prístupov – od jednoduchých empirických metód, cez aproximácie pomocou zjednodušených MKP modelov, až po detailné priestorové modelovanie v prostredí metódy konečných prvkov.

[1] Daniel Beutelhauser, Ing., daniel.beutelhauser@stuba.sk

Nasledujúce kapitoly prezentujú parametrickú analýzu, ktorej účelom je prezentovať a porovnať výsledky získané rôznymi metódami výpočtu. Na základe tohto porovnania by malo byť možné určiť vhodnosť jednotlivých výpočtových metód vzhľadom na pomer medzi ich náročnosťou a presnosťou.

2. Metodika analýzy

V rámci analýzy sa uvažuje so 7 variantmi obojsmerne nosnej dosky, ktorá je po okrajoch kĺbovo podopretá. Zaťaženie dosky sa uvažuje v 2 variantoch. V prvom sa uvažuje iba vlastná tiaž dosky, v druhom vlastná tiaž a plošné zaťaženie 3kN/m^2, ktoré približne reprezentuje stále zaťaženie konštrukcie počas jej používania. Vlastnosti skúmaných dosiek sú zhrnuté v Tab. 1.

Tab. 1 - Skúmané dosky

Lx (m)	Ly (m)	h (m)	Elementy
6,0	6,0	0,220	SL-M 100-120.6
7,0	7,0	0,250	SL-M 120-140.6
9,0	9,0	0,300	SL-M 180-200.6
10,0	10,0	0,350	SL-M 220-240.6
12,0	12,0	0,400	SL-M 260-280.6
14,0	14,0	0,450	SL-M 260-300.6
16,0	16,0	0,500	SL-M 260-340.6

Na účely vyľahčenia sa uvažuje s prvkami Cobiax Slim-Line. V Tab. 2 sú zhrnuté výrobcom deklarované vlastnosti dosiek dosiahnuté pri použití konkrétneho elementu [7].

Tab. 2 - Parametre dosky danej hrúbky pri použití konkrétneho vyľahčovacieho elementu [7]

Element	h (m)	kg/m^3	Redukcia tuhosti
SL-M 100-120.6	0,220	1900	0,95
SL-M 120-140.6	0,250	1860	0,93
SL-M 180-200.6	0,300	1700	0,90
SL-M 220-240.6	0,350	1680	0,89
SL-M 260-280.6	0,400	1658	0,88
SL-M 260-300.6	0,450	1751	0,88
SL-M 260-340.6	0,500	1826	0,88

V rámci analýzy sa použijú 3 rôzne výpočtové postupy. Prvým bude ručný výpočet, s použitím empirických vzorcov podľa Bachmanna a Ammanna [8]. Druhou metódou bude modelovanie dosky ako 2D prvku v programe SCIA Engineer bežne používanom v inžinierskej praxi. Pre tieto 2 metódy sa použijú vlastnosti dosky deklarované výrobcom, ktoré sú zhrnuté v Tab. 2. Tretí postup bude spočívať vo vytvorení podrobných 3D modelov skúmaných dosiek v programe Ansys Workbench, ktoré budú verne zohľadňovať materiálové aj tvarové charakteristiky.

3. Výpočtové metódy

3.1. Ručný výpočet

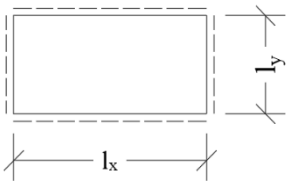
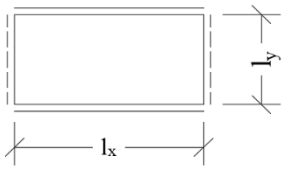
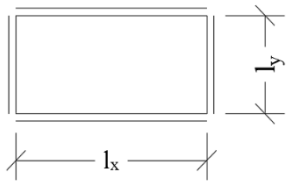
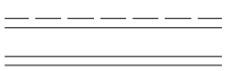
Na účely výpočtu sa v tejto analýze využila metóda, ktorá bola vyvinutá Hugom Bachmannom v spolupráci s Walterom Ammanom [8]. Na základe empirických skúseností s dynamikou konštrukcií vytvorili vzorce na výpočet prvých dvoch vlastných frekvencií dosiek pri rôznych okrajových podmienkach. Vzťah pre výpočet prvých dvoch vlastných frekvencií dosky nosnej v dvoch smeroch je definovaný vzorcom (1):

$$f_n = \frac{\varphi_n}{l_x^2} \times \sqrt{\frac{E \times h_d^3}{12 \times (1-\nu^2) \times m}}, \tag{1}$$

kde φ_n je parameter určený okrajovými podmienkami na základe Tab. 3, pričom sa pre druhú vlastnú frekvenciu vyberá parameter s menšou hodnotou z dvojice $\varphi_{1,2}$; $\varphi_{2,1}$. Index n predstavuje číslo vlastného tvaru, E je Youngov modul pružnosti, h_d je hrúbka dosky, ν je Poissonovo číslo a m je plošná hmotnosť dosky v kg/m^2.

Parametre vyplývajúce z okrajových podmienok skúmanej konštrukcie sú uvedené v Tab. 3, člen α označuje pomer medzi dĺžkami strán l_x a l_y [8].

Tab. 3 - Parametre pre ručný výpočet

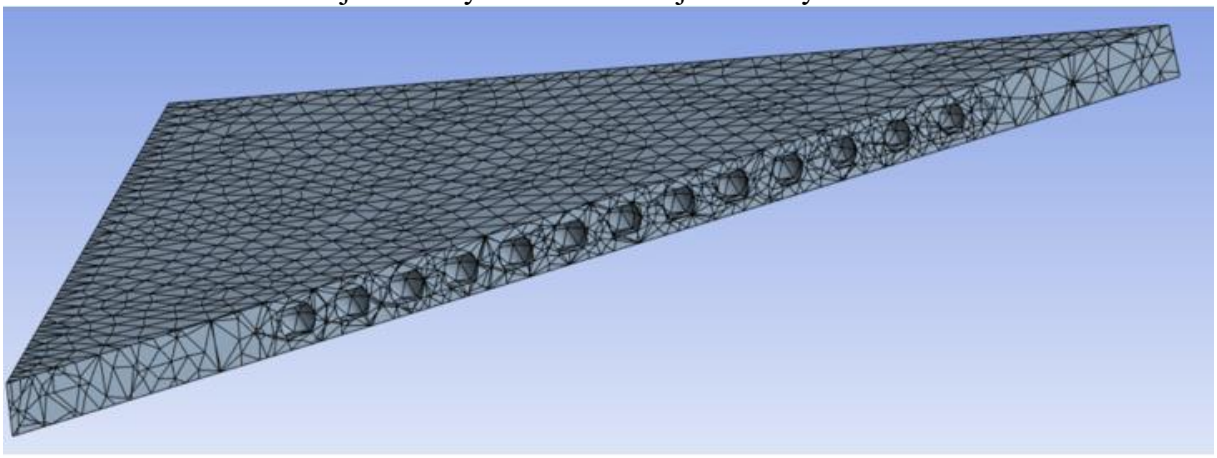
Okrajová podmienka	Koeficient φ
	$\varphi_{1,1} = 1.57 \cdot (1+\alpha^2)$ $\varphi_{2,1} = 6.28 \cdot (1+0.25 \cdot \alpha^2)$ $\varphi_{1,2} = 1.57 \cdot (1+4 \cdot \alpha^2)$
	$\varphi_{1,1} = 1.57 \cdot \sqrt{1+2.5 \cdot \alpha^2 + 5.14 \cdot \alpha^4}$ $\varphi_{2,1} = 6.28 \cdot \sqrt{1+0.625 \cdot \alpha^2 + 0.321 \cdot \alpha^4}$ $\varphi_{1,2} = 1.57 \cdot \sqrt{1+9.32 \cdot \alpha^2 + 39.06 \cdot \alpha^4}$
	$\varphi_{1,1} = 1.57 \cdot \sqrt{5.14+3.13 \cdot \alpha^2 + 5.14 * \alpha^4}$ $\varphi_{2,1} = 9.82 \cdot \sqrt{1+0.298 \cdot \alpha^2 + 0.132 * \alpha^4}$ $\varphi_{1,2} = 1.57 \cdot \sqrt{5.14+11.65 \cdot \alpha^2 + 39.06 * \alpha^4}$
	Kĺbové podopretie Votknutie

3.2. 2D MKP model

Výpočtový 2D MKP model sa vytvoril v programe SCIA Engineer 24, ktorý je bežne používaný v inžinierskej praxi. V rámci výpočtu sa doska uvažovala ako 2D prvok. Vplyv vyľahčovacích prvkov na vlastnosti dosky sa zohľadnil použitím vlastností deklarovaných výrobcom, ktoré sú uvedené v Tab. 2. Pri výpočte sa uvažovalo s Mindlinovou doskovou teóriou („hrubá doska“). Doska sa modelovala ako kĺbovo podopretá po okrajoch.

3.3. 3D MKP model

Ako ďalšia bola vykonaná komplexnejšia analýza pomocou softvéru ANSYS Workbench Mechanical 2023 R2. V tomto prípade bola doska modelovaná v 3D s reálnou geometriou bez zjednodušené, pomocou 3D prvkov (SOLID187, tetrahedrálny prvok s 10 uzlami a SURF154, 2D rovinný prvok s 4-8 uzlami [9], maximálna veľkosť prvkov 0,5 m). Použité prvky sú štandardné pre tento typ analýzy a ich veľkosť bola iterovaná na základe vplyvu na výsledky (t. j. prvky boli zmenšované, pokým sa nestala zmena výsledku zanedbateľná). V oblastiach s dutinami boli modelované skutočné dutiny s príslušným tvarom na základe použitého vyľahčovacieho elementu. Výrez z 3D modelu znázorňujúci dutiny v doske a sieti je uvedený na Obr. 1.



Obr. 1 - Ilustračný rez skúmanou doskou

4. Výsledky analýzy

Výsledné vlastné frekvencie kmitania pre jednotlivé dosky s uvážením 2 variantov zaťaženia sú zhrnuté v tabuľkách v nasledujúcich podkapitolách.

4.1. Doska bez priťaženia

Vypočítané vlastné frekvencie pre jednotlivé skúmané typy dosiek bez uváženia dodatočného priťaženia sú zhrnuté v Tab. 4.

Tab. 4 - Vlastné frekvencie vyľahčených dosiek bez uváženia priťaženia

Vyľahčovací prvok	Lx = Ly (m)	h(m)	ANSYS F1	ANSYS F2	SCIA F1	SCIA F2	Bachamann F1	Bachamann F2	
SL-M 100-120.6	6,0	0,220	22,81	56,48	21,58	54,00	21,90	54,74	
SL-M 120-140.6	7,0	0,250	19,02	47,18	18,03	45,09	18,28	45,70	
SL-M 180-200.6	9,0	0,300	14,14	35,56	13,48	33,71	13,66	34,14	
SL-M 220-240.6	10,0	0,350	12,82	31,87	12,72	31,82	12,91	32,27	Hz
SL-M 260-280.6	12,0	0,400	10,09	25,12	10,11	25,29	10,25	25,64	
SL-M 260-300.6	14,0	0,450	8,40	20,93	8,13	17,27	8,25	20,62	
SL-M 260-340.6	16,0	0,500	7,06	17,58	6,77	16,95	6,87	17,18	

4.2. Doska s priťažením

Vypočítané vlastné frekvencie pre jednotlivé skúmané typy dosiek s uvážením dodatočného priťaženia sú zhrnuté v Tab. 5.

Tab. 5 - Vlastné frekvencie vyľahčených dosiek s uvážením priťaženia

Vyľahčovací prvok	Lx = Ly (m)	h(m)	ANSYS F1	ANSYS F2	SCIA F1	SCIA F2	Bachamann F1	Bachamann F2	
SL-M 100-120.6	6,0	0,220	16,77	41,49	16,40	41,04	16,71	41,77	
SL-M 120-140.6	7,0	0,250	14,37	35,62	14,00	35,02	14,25	35,63	
SL-M 180-200.6	9,0	0,300	10,95	27,52	10,66	26,65	10,84	27,09	
SL-M 220-240.6	10,0	0,350	10,30	25,58	10,32	25,81	10,50	26,26	Hz
SL-M 260-280.6	12,0	0,400	8,31	20,70	8,36	20,92	8,51	21,27	
SL-M 260-300.6	14,0	0,450	7,06	17,60	6,90	20,35	7,02	17,55	
SL-M 260-340.6	16,0	0,500	6,07	15,14	5,86	14,67	5,96	14,90	

4.3. Porovnanie výsledkov

Porovnanie výsledkov vlastných frekvencií kmitania rôznych variantov vyľahčených dosiek sú zhrnuté v Tab. 6 (dosky bez dodatočného priťaženia) a Tab. 7 (doska s dodatočným priťažením). V rámci porovnania sa ako referenčná hodnota berie vždy výsledok z programu ANSYS.

Tab. 6 – Zhoda vo vlastných frekvenciách kmitania vyľahčených dosiek bez uváženia priťaženia

Vyľahčovací prvok	Lx = Ly (m)	h(m)	ANSYS F1	ANSYS F2	SCIA F1	SCIA F2	Bachamann F1	Bachamann F2
SL-M 100-120.6	6,0	0,220	1	1	0,95	0,96	0,96	0,97
SL-M 120-140.6	7,0	0,250	1	1	0,95	0,96	0,96	0,97
SL-M 180-200.6	9,0	0,300	1	1	0,95	0,95	0,97	0,96
SL-M 220-240.6	10,0	0,350	1	1	0,99	1,00	1,01	1,01
SL-M 260-280.6	12,0	0,400	1	1	1,00	1,01	1,02	1,02
SL-M 260-300.6	14,0	0,450	1	1	0,97	0,83	0,98	0,99
SL-M 260-340.6	16,0	0,500	1	1	0,96	0,96	0,97	0,98

Tab. 7 – Zhoda vo vlastných frekvenciách kmitania vyľahčených dosiek s uvážením dodatočného priťaženia

Vyľahčovací prvok	Lx = Ly (m)	h(m)	ANSYS F1	ANSYS F2	SCIA F1	SCIA F2	Bachamann F1	Bachamann F2
SL-M 100-120.6	6,0	0,220	1	1	0,98	0,99	1,00	1,01
SL-M 120-140.6	7,0	0,250	1	1	0,97	0,98	0,99	1,00
SL-M 180-200.6	9,0	0,300	1	1	0,97	0,97	0,99	0,98
SL-M 220-240.6	10,0	0,350	1	1	1,00	1,01	1,02	1,03
SL-M 260-280.6	12,0	0,400	1	1	1,01	1,01	1,02	1,03
SL-M 260-300.6	14,0	0,450	1	1	0,98	1,16	0,99	1,00
SL-M 260-340.6	16,0	0,500	1	1	0,97	0,97	0,98	0,98

5. Záver

Na základe prezentovaných výsledkov analýz je možné konštatovať, že pokiaľ ide o výpočet prvých dvoch vlastných ohybových frekvencií železobetónovej dosky s danými okrajovými podmienkami, použiteľnou možnosťou je buď ručný výpočet na základe vzorca (1), 2D MKP analýza, ako aj 3D FE analýza. Ak sa ako referenčná hodnota použijú výsledky 3D MKP analýzy, ktoré by mali byť najpresnejším odrazom reality, použitie zjednodušených metód výpočtu, ako sú ručné výpočty alebo 2D FE analýza, vo všeobecnosti vedie k chybe nie väčšej ako 5%. To znamená, že pri praktickom výpočte vlastných frekvencií kmitania takýchto dosiek je obzvlášť vo fáze predbežných návrhov dimenzií možné s pomerne dobrou úspešnosťou využiť časovo a výpočtovo efektívne zjednodušené metódy výpočtu.

6. Použitá literatúra

1. European Commission (2020) Stepping up Europe's 2030 climate ambition. Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people. Brussels
2. Oukaili N, Merie H, Allawi A, Wardeh G (2024) Reduced Volume Approach to Evaluate Biaxial Bubbled Slabs' Resistance to Punching Shear. https://doi.org/10.3390/buildings14030676
3. Gajewski T, Staszak N, Garbowski T (2023) Optimal Design of Bubble Deck Concrete Slabs: Serviceability Limit State. https://doi.org/10.3390/ma16144897
4. Schnellenbach-Held M, Pfeffer K (2002) Punching behavior of biaxial hollow slabs. Cem Concr Compos 24:551–556. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00071-3
5. Thompson RA (2017) Wright State University Neuroscience Building. https://www.cobiaxusa.com/wright-state-university. Accessed 24 Mar 2023
6. European Commission (2006) Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and public buildings, and gymnastic halls. Publications Office
7. Cobiax Deutschland GmbH (2022) A DEEP-DIVE INTO COBIAX Technology and execution in detail
8. Bachmann Hugo, Ammann Walter (1987) Vibrations in Structures Induced by Man and Machines, 3rd ed. IABSE-AIPC-IVBH, Zürich
9. ANSYS Inc (2011) ANSYS Mechanical APDL Element Reference. Canonsburg

Roman Červenka[1]
Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 4. ročník

SIMULÁCIA TEPLOTNÝCH ÚČINKOV NA PRIEČNU VÄZBU OCEĽOVÉHO RÁMU

SIMULATION OF THERMAL EFFECTS ON THE TRANSVERSE CONNECTION OF A STEEL FRAME

Abstract
The fire resistance of steel frame structures represents a key aspect of structural design, while the provisions of Eurocode EN 1993-1-2 do not cover all fire scenarios. This issue requires additional analyses of the thermal behaviour of structural members. The paper focuses on the simulation of thermal effects acting on the transverse connection of a steel frame, carried out using the ANSYS simulation software. The study examines heat transfer across the steel cross-section and along the column length in order to identify the nature of thermal gradients developing during fire exposure.

Kľúčové slová / Key Words
Požiarna odolnosť; oceľová rámová konštrukcia; teplotná analýza; simulácia tepelných účinkov.

1. Úvod

Požiarna odolnosť nosných konštrukcií predstavuje kľúčový aspekt návrhu z hľadiska bezpečnosti a spoľahlivosti. Časti 1-2 všetkých konštrukčných Eurokódov sa zaoberajú návrhom nosných konštrukcií na účinky požiaru, pričom vychádzajú zo spoločných princípov a metód [1]. Použitý výpočtový model musí reflektovať reálne správanie konštrukcie počas požiaru, vrátane vplyvu teploty na materiálové vlastnosti, tuhosť a stabilitu.

Na posúdenie konštrukcie možno aplikovať tri prístupy: globálnu analýzu konštrukcie, analýzu jej časti a analýzu jednotlivého prvku, pričom výber metódy závisí od rozsahu posudzovanej oblasti [2] [3]. Hodnotenie požiarnej odolnosti sa vykonáva na základe normového požiaru podľa ISO 834 alebo reálnych požiarov, pričom konštrukčné prvky musia spĺňať kritériá R (nosnosť), E (celistvosť) a I (izolácia) [4].

Zmena teploty významne ovplyvňuje mechanické vlastnosti ocele a tým aj celkové konštrukčné správanie. Z tohto dôvodu je teplotná analýza nevyhnutnou súčasťou návrhu a predstavuje základ pre následné hodnotenie pevnostných a deformačných prejavov oceľových rámových konštrukcií vystavených účinkom požiaru.

2. Materiálové vlastnosti ocele

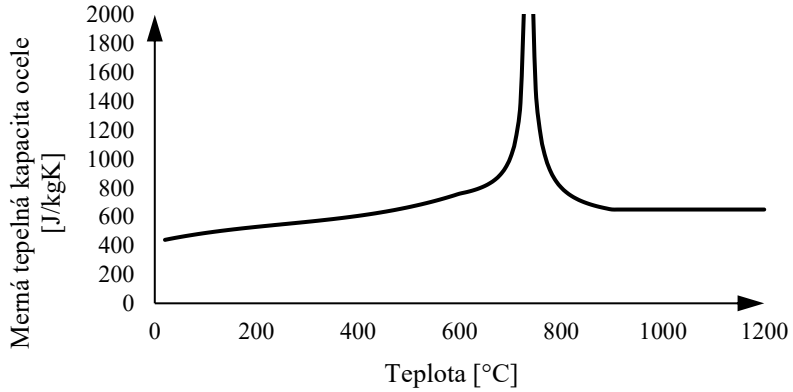
Vysoké teploty majú nepriaznivý vplyv na oceľové konštrukcie v dôsledku vysokej tepelnej vodivosti a subtílnych prierezov, čo vedie k rýchlemu nárastu teploty a následnej degradácii mechanických vlastností. Redukované hodnoty medze klzu, modulu pružnosti a ďalších parametrov

[1] Roman, Červenka, Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Vazovova 5, 512 43 Bratislava

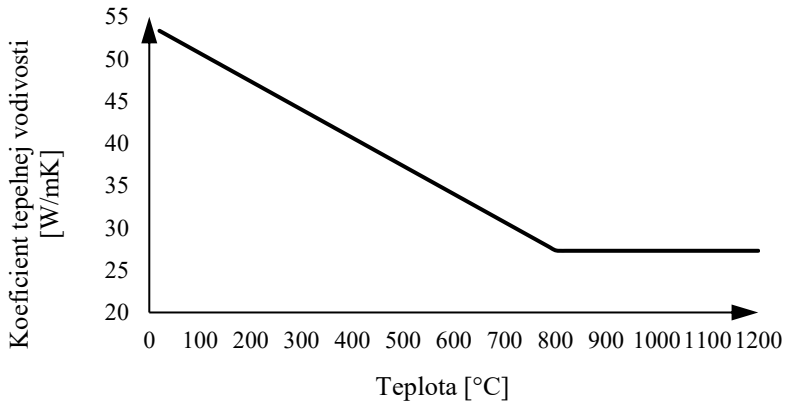
sa stanovujú podľa súčiniteľov uvedených v norme [5]. Tepelné vlastnosti, ako merná tepelná kapacita a koeficient tepelnej vodivosti, sú rovnako závislé od teploty [5].

2.1 Tepelné vlastnosti ocele

Správanie ocele pri požiari ovplyvňujú jej termofyzikálne vlastnosti ako je hustota, pomerné tepelné predĺženie, merná tepelná kapacita c (Obr.1) a tepelná vodivosť λ (Obr.2). Pri teplotách okolo 730 °C dochádza k nepravidelnostiam v ich priebehoch v dôsledku premeny perlitu na austenit pri približne 723 °C [2].



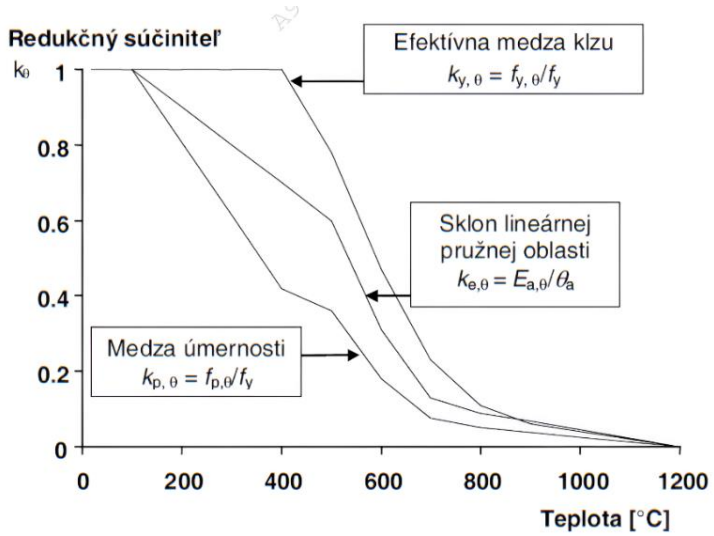
Obr. 1: Merná tepelná kapacita ocele v závislosti od teploty [4]



Obr. 2: Koeficient tepelnej vodivosti ocele v závislosti od teploty [4]

2.2 Mechanické vlastnosti ocele

Hlavným rizikom pre konštrukciu počas požiaru je zmena mechanických vlastností konštrukčných materiálov. S rastúcou teplotou sa tieto mechanické vlastnosti znižujú. Redukované hodnoty medze klzu, pevnosti v tlaku, medze úmernosti a modulu pružnosti pre rôzne teploty sa získavajú vynásobením hodnôt za normálnej teploty príslušným súčiniteľom uvedeným v norme. Vzťahy pre jednotlivé charakteristiky sú na obrázku 3.



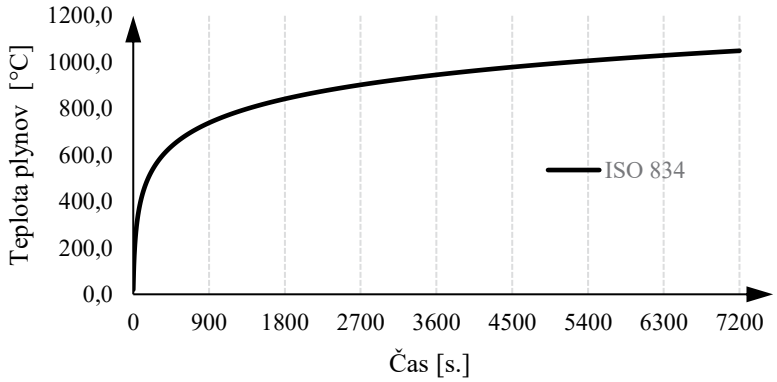
Obr. 3: Zmena mechanických vlastností ocele v závislosti od teploty [4]

3. Zaťaženia pôsobiace na konštrukciu pri požiari

Pri požiari sa zaťaženie delí na mechanické (pre statický výpočet) a tepelné (pre tepelný výpočet), ktoré spôsobuje ohriatie konštrukcie.

Tepelné zaťaženie sa vyjadruje pomocou teplotných kriviek alebo požiarnych modelov. Požiar prebieha v troch fázach – rozohrievanie, plne rozvinutý požiar a dohorievanie. Pre návrh konštrukcií je rozhodujúca fáza plne rozvinutého požiaru. V technickej praxi sa používajú tri základné skupiny modelov [6]:

- Nominálne modely (napr. ISO 834 na obrázku 4) – definujú závislosť teploty od času bez ohľadu na vlastnosti priestoru,
- Parametrické modely – zohľadňujú požiarne zaťaženie, odvetranie a tepelno-technické vlastnosti konštrukcie,
- Lokálne modely – opisujú situácie, keď oheň pôsobí len v obmedzenej oblasti.



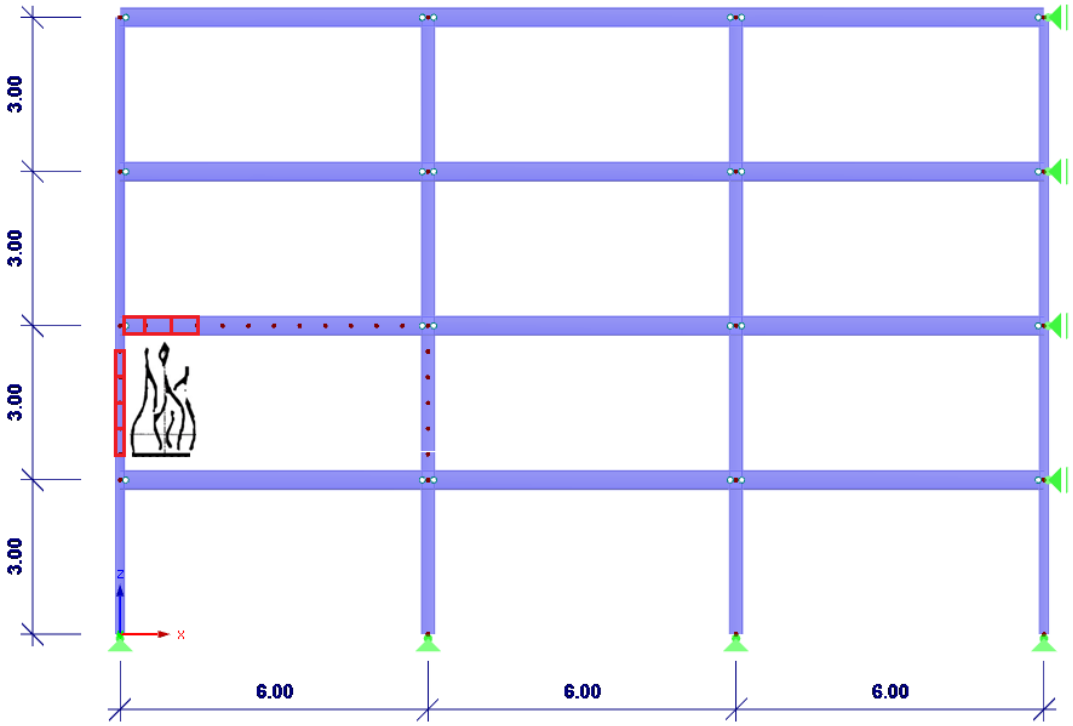
Obr. 4: Nominálna teplotná krivka ISO 834 [2]

Pre presnejšie výpočty sa používajú zdokonalené modely, ako jednozónové, dvojzónové alebo dynamické modely, ktoré zohľadňujú výmenu hmoty a energie v priestore požiaru. V tomto článku bol ako zdroj tepelného pôsobenia použitý normový požiar podľa ISO 834, aplikovaný v prostredí ANSYS na simuláciu teplotného poľa konštrukcie.

4. Teplotná analýza

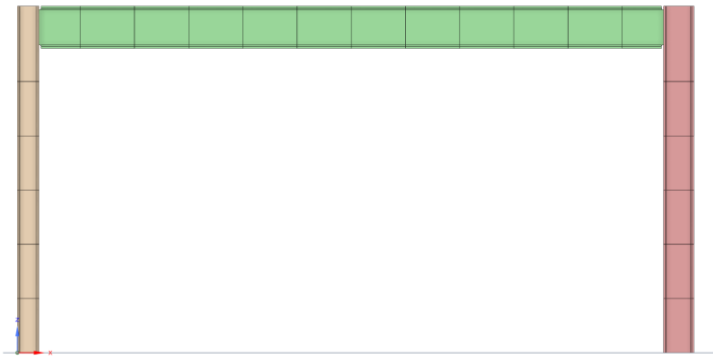
Za účelom vykonania teplotnej analýzy rámovej konštrukcie s neposuvnými uzlami vystavenej požiaru bola vytvorená dvojrozmerná numerická reprezentácia rámu pozostávajúceho z troch polí a štyroch podlaží. Rozpätia jednotlivých polí majú dĺžku 6 m, pričom výška každého podlažia je 3 m. Rámová konštrukcia s neposuvnými uzlami bola navrhnutá pre bežnú teplotu s prierezmi vonkajších stĺpov typu HEB 200 a vnútorných stĺpov typu HEB 280. Priečle boli dimenzované ako profily HEA 400, pričom všetky nosné prvky, t.j. stĺpy aj nosníky boli uložené kĺbovo.

Na základe výsledkov predchádzajúcej analýzy [7] bol ako kritický prvok pri požiari identifikovaný vonkajší stĺp s prierezom HEB 200. Z tohto dôvodu bol pre detailnú teplotnú analýzu zvolený vonkajší stĺp na druhom nadzemnom podlaží. Každé podlažie bolo pritom uvažované ako samostatný požiarny úsek, čo umožňuje nezávislé hodnotenie priebehu teplôt a ich vplyvu na stabilitu jednotlivých častí rámu. Geometrická schéma rámovej konštrukcie použitá v analýze je zobrazená na obrázku 5.



Obr. 5: Schéma rámovej konštrukcie [8]

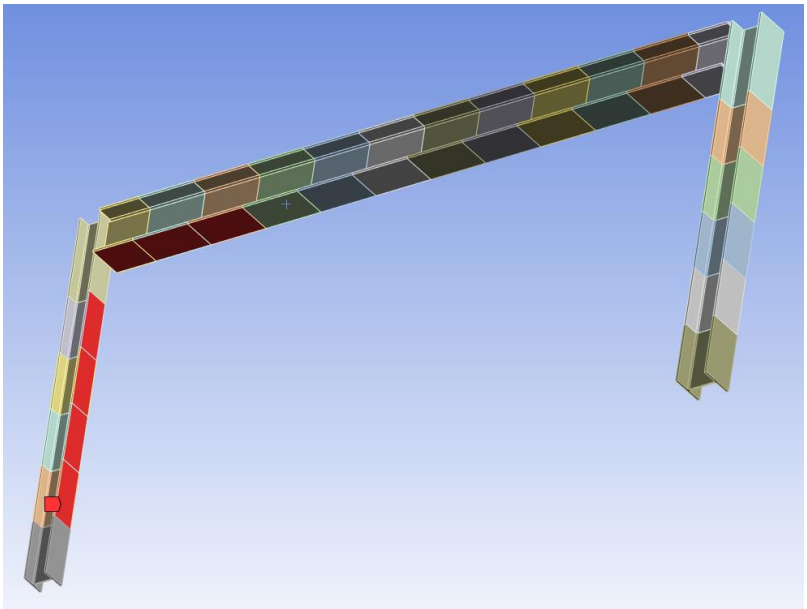
V rámci analýzy bol simulovaný lokálny požiar, ktorý bol umiestnený v blízkosti vonkajšieho stĺpa. Keďže nebola realizovaná CFD analýza prúdenia horúcich spalín a rozloženia teplotného poľa, stĺp a priečla boli rozdelené na segmenty s dĺžkou 0,5 m. Schéma rozdelenia konštrukčných prvkov na segmenty je znázornená na obrázku 6. Takéto členenie umožnilo aplikovať normovú teplotnú krivku ISO 834 len na vybrané segmenty konštrukcie, čím bol simulovaný lokálny účinok požiaru v obmedzenej oblasti.



Obr. 6: Rozdelenie konštrukčných prvkov na segmenty [9]

Vertikálny rozsah pôsobenia požiaru na stĺpe bol definovaný ako oblasť v rozmedzí približne ±1,0 až 1,5 m od stredu plameňa. Pri predpoklade, že stred plameňa sa nachádza vo výške 1,5 m, bola normová teplotná krivka ISO 834 aplikovaná na segmenty stĺpa v intervale 0,5–2,5 m (segmenty 2 až 5). V horizontálnom smere, na priečli, bol rozsah požiarneho pôsobenia určený od miesta pripojenia k horiacemu stĺpu po vzdialenosť približne 1,5 m pozdĺž jeho dĺžky, pričom na zodpovedajúce segmenty nosníka bola rovnako aplikovaná teplotná krivka ISO 834.

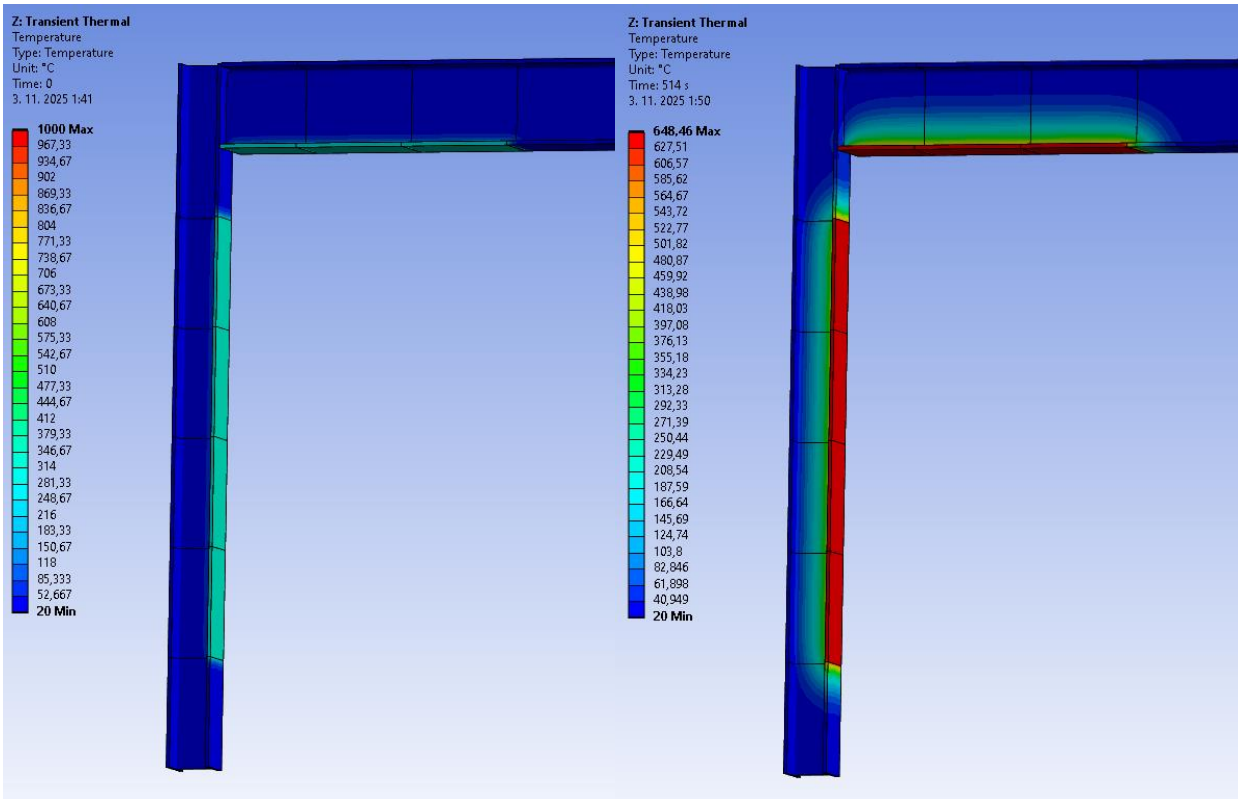
Normová krivka ISO 834 bola aplikovaná iba na tie povrchové plochy segmentov, ktoré boli priamo vystavené pôsobeniu požiaru, zatiaľ čo nevystavené plochy zostali bez teplotného zaťaženia. Rozloženie a rozsah teplotného zaťaženia sú znázornené na obrázku 7. V rámci tepelnej analýzy sa uvažovalo výhradne iba s prenosom tepla kondukciou v oceli, bez zapojenia mechanizmov konvekcie a radiácie, aby sa izoloval vplyv samotného tepelného šírenia materiálom konštrukčných prvkov.



Obr. 7: Plochy segmentov s aplikovaným požiarnym zaťažením [9]

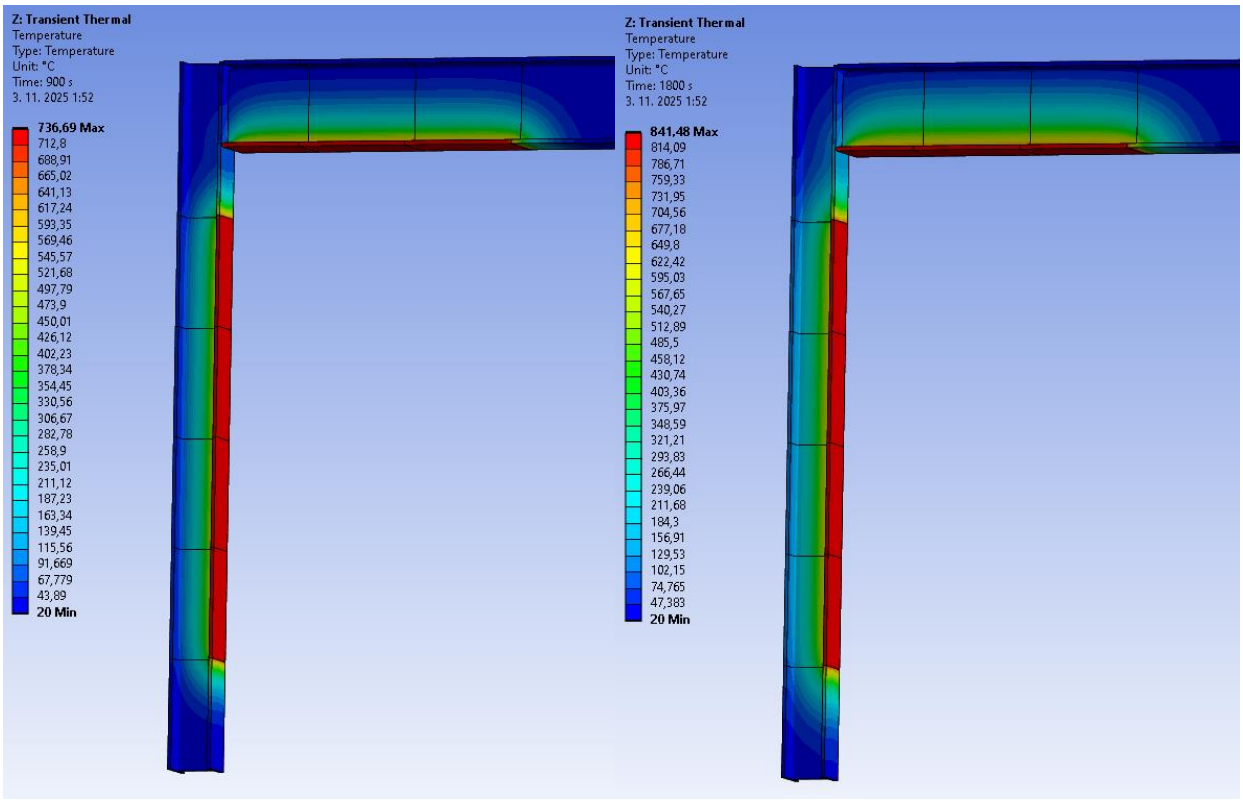
Z predchádzajúcej analýzy [7], v ktorej boli okrem iného skúmané aj kritické teploty stĺpov v rámových konštrukciách bola identifikovaná kritická teplota prúta pre skúmaný stĺp s hodnotou 648,5°C.

Na obrázkoch 8 až 11 sú prezentované výsledky teplotnej analýzy rámovej konštrukcie. Obrázok 8 znázorňuje počiatočný teplotný stav modelu v čase t = 0 s a následné rozloženie teplôt v čase t = 514 s, v ktorom pásnica profilu vystavená pôsobeniu požiaru dosiahla kritickú teplotu 648,5 °C. Táto teplota predstavuje hranicu únosnosti oceľového prvku, po ktorej prekročení sa predpokladá jeho zlyhanie v dôsledku výrazného poklesu pevnostných a deformačných vlastností materiálu.



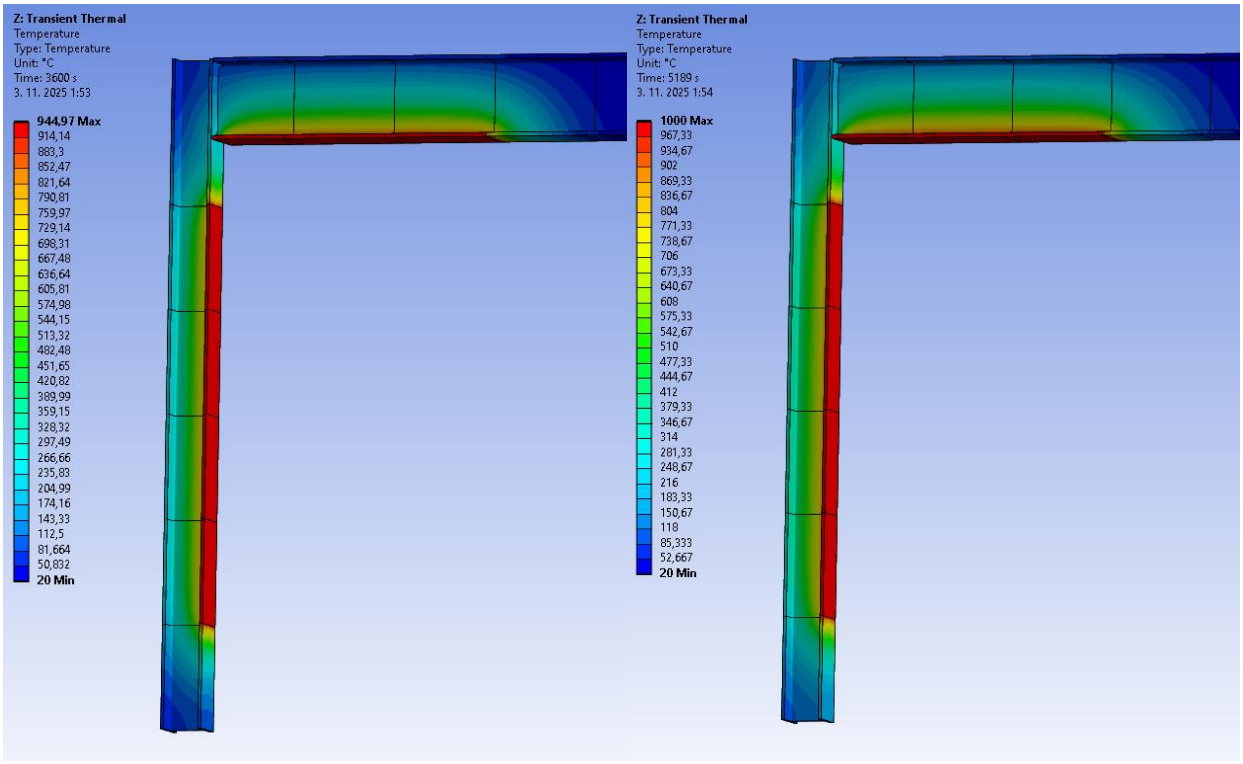
Obr. 8: Priebeh teplôt v čase 0 s. / 514 s. [9]

Na obrázku 9 je zobrazené rozdelenie teplôt v čase t = 15 min. a v čase t = 30 min.



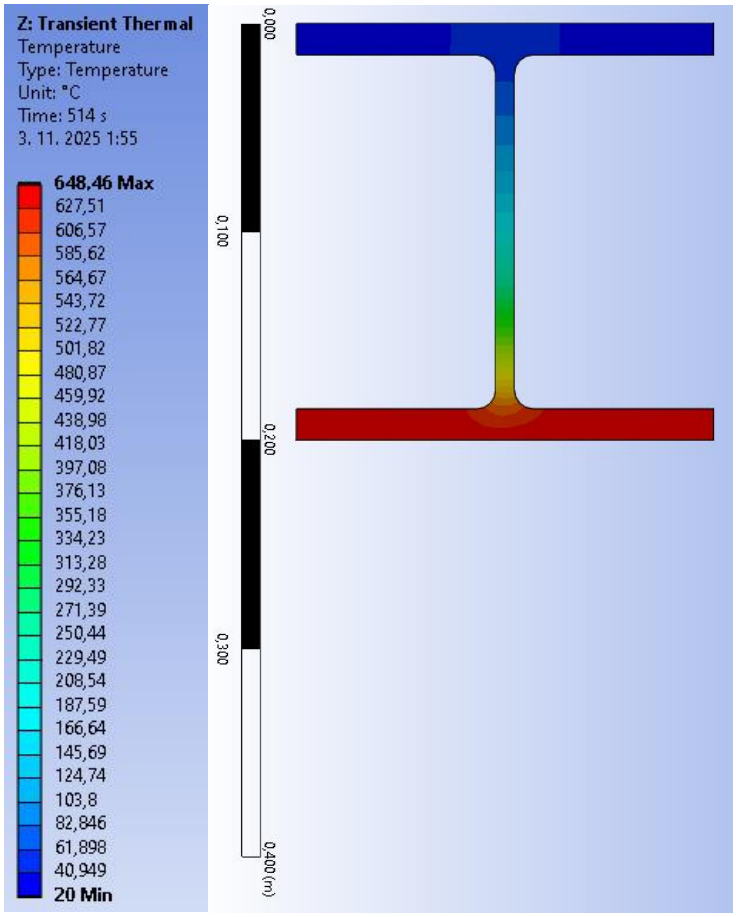
Obr. 9: Priebeh teplôt v čase 900 s. / 1800 s. [9]

Obrázok 10 zobrazuje rozloženie teplôt v čase t = 60 min a v čase t = 5189 s, čo zodpovedá záverečnému okamihu simulácie, pri ktorom teplota podľa normovej krivky ISO 834 dosiahla hodnotu 1000 °C. Pokračovanie simulácie nad túto hranicu už nebolo opodstatnené, keďže pri teplotách nad 1000 °C dochádza k výraznému zníženiu modulu pružnosti a medze klzu ocele, v dôsledku čoho oceľ stráca schopnosť prenášať mechanické zaťaženie a ďalší nárast teploty nemá z hľadiska únosnosti konštrukcie praktický význam.



Obr. 10: Priebeh teplôt v čase 3600 s. / 5189 s. [9]

Obrázok 11 detailne znázorňuje priebeh teplotného poľa naprieč prierezom v čase t = 514 s, teda v okamihu, keď prierez dosiahol kritickú teplotu 648,5 °C. Teoreticky by v tomto čase mal prvok dosiahnuť hranicu svojej únosnosti, avšak z rozloženia teplôt je zrejmé, že kritická teplota bola dosiahnutá len v oblasti krajnej pásnice. Väčšina steny prierezu a druhá pásnica si pritom zachovávajú teplotu menšiu ako 400 °C. Tento teplotný gradient vytvára predpoklad, že prvok by mohol aj po dosiahnutí kritickej teploty v najsilnejšie exponovanej oblasti naďalej dočasne plniť svoju nosnú funkciu, hoci už s výrazne zníženou rezervou únosnosti.



Obr. 11: Rozloženie teploty naprieč prierezom v čase 514 s. – dosiahnutie kritickej teploty [9]

5. Záver

Výsledky teplotnej analýzy poukázali na potrebu ďalšieho rozšírenia výskumu v danej problematike, a to najmä z hľadiska komplexného hodnotenia odozvy konštrukcie pri pôsobení požiaru. V predloženej analýze bola pozornosť sústredená primárne na teplotné rozloženie v prvkoch rámovej konštrukcie, pričom nebol zohľadnený vplyv mechanického zaťaženia ani deformácií vznikajúcich v dôsledku teplotného namáhania.

Pre úplné posúdenie správania sa oceľového rámu pri požiari je preto potrebné doplniť model o:

- mechanické zaťaženie pôsobiace na konštrukciu, čo umožní sledovať vznik vnútorných napätí, plastických deformácií a vzperného správania stĺpov,
- tepelno-mechanickú väzbu, ktorá by prepojila prenos tepla s následnou odozvou materiálu a konštrukcie,
- a tiež detailnejšie modelovanie konštrukčných detailov, ktoré môžu mať významný vplyv na lokálnu aj globálnu stabilitu rámu.

Zahrnutie týchto aspektov do budúcich analýz by umožnilo komplexnejšie vyhodnotenie interakcie medzi teplotným gradientom, napäťovo-deformačným stavom a nosnou schopnosťou konštrukcie, čo by prispelo k presnejšiemu určeniu okamihu zlyhania a k optimalizácii návrhu oceľových rámov vystavených požiaru.

Literatúra

[1] European Committee for Standardization (CEN), EN 1991-1-2: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire., B-1050 Brusel, 2009.

[2] M. Bellová, J. Olbřímek, A. Osvald, J. Prochádzka, R. Štefan a M. Štujberová, Navrhovanie konštrukcií na požiarnu odolnosť podľa eurokódov, Bratislava: MABAG spol. s.r.o., 2010, pp. 1-216.

[3] J.-M. Franssen a R. Zaharia, Design of Steel Structures subjected to Fire, Liege: Led Éditions de l´Université de Liége, 2006, pp. 1-185.

[4] European Committee for Standardization (CEN), EN 1993-1-2 – Design of Steel Structures, Part 1.2: General Rules – Structural Fire, Brussels, Belgium, 2004.

[5] ECCS - Technical Committe 3, Design Manual on the European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures, 1 ed., Brussels (Belgium): eccspublications, 1985, pp. 1-207.

[6] F. Wald, J. Macháček, M. Jandera, J. Dolejš, Z. Sokol a P. Hájek, Structural Steel Design according to Eurocodes, Praha: Czech Technical University Publishing House, 2012, pp. 1-193.

[7] R. ČERVENKA, „Buckling length of steel columns in frame structures stressed by fire,“ rev. *Juniorstav 2024*, Brno, 2024.

[8] Dlubal RFEM, „FEM Structural Analysis Software, verzia 5.30.01,“ Dlubal, Praha.

[9] ANSYS, Inc. ANSYS Workbench, Version 23 R1 [softvér], Canonsburg (PA, USA): ANSYS, Inc., 2023.

***Tadeáš Fecko*[1]**
Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 4. ročník

VPLYV MNOŽSTVA OHYBOVEJ VÝSTUŽE NA ŠMYKOVÚ ODOLNOSŤ LOKÁLNE PODOPRETÝCH DOSIEK VYROBENÝCH Z BETÓNU S OBSAHOM HRUBÉHO RECYKLOVANÉHO KAMENIVA

EFFECT OF THE AMOUNT OF FLEXURAL REINFORCEMENT ON THE PUNCHING SHEAR RESISTANCE OF FLAT SLABS MADE OF CONCRETE WITH COARSE RECYCLED AGGREGATE

Abstract
The paper describes an experimental investigation of the punching shear resistance of locally supported slabs made from recycled aggregate concrete, and compares the results with predictions based on design approaches. The casting and testing of nine slabs measuring 2.5 x 2.5 m and 0.25 m thick made with 50 and 100% replacement of coarse natural aggregate with recycled aggregate are described. The paper focuses on the influence of the amount of flexural reinforcement and the margin of safety of predictions used in practice. The conclusions showed that recycled aggregate does not have a significant negative impact on punching shear resistance. Flexural reinforcement has a positive effect on shear resistance, and the CSCT model provides the most accurate prediction of punching shear resistance among all the approaches compared in this paper.

Kľúčové slová / Key Words
betón z recyklovaného kameniva, pretlačenie, ohybová výstuž, návrhový postup

1. Úvod

Recyklované kamenivo (Recycled Aggregate – RA) ako náhrada prírodného kameniva (Natural Aggregate – NA) v betóne má mnohé výhody, ako sú využívanie stavebného odpadu z demolácií, zníženie potreby ťažby prírodného kameniva, potenciálne nižšie prepravné vzdialenosti kameniva či cena, ktorá by v budúcnosti mala ešte viac klesať. S RA sú však spojené aj nevýhody, ako potreba triedenia a následná potreba spracovania stavebného odpadu, ktorá si vyžaduje stroje, ľudí a peniaze, a tiež neisté mechanické vlastnosti betónu z recyklovaného kameniva (Recycled Aggregate Concrete – RAC). Tento článok pojednáva aj o zmene mechanických vlastností RAC a vplyv RA na šmykovú odolnosť proti pretlačeniu lokálne podopretých dosiek.

Pretlačenie je v praxi často diskutovaná téma v súvislosti s lokálne podopretými doskami, pretože ide o krehké šmykové porušenie bez náznakov blížiaceho sa kolapsu konštrukcie. Toto porušenie je zapríčinené vysokou koncentráciou šmykových napätí v okolí stĺpa a vo veľkej miere je závislé od hrúbky konštrukcie, pevnosti betónu, rozmeru podpery a množstva ohybovej výstuže. Vplyv jednotlivých zložiek je možné vyčísliť normalizáciou výsledkov experimentov. Výsledky experimentov je vždy potrebné porovnávať s výpočtovými postupmi, ktoré používajú inžinieri v praxi pri posudzovaní existujúcich konštrukcií či pri návrhu nových konštrukcií.

[1] Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra betónových konštrukcií a mostov, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava

2. Experimentálny program

Navrhnutý bol experimentálny program skúšania deviatich izolovaných dosiek hrúbky 25 cm vyrobených s troma úrovňami náhrady hrubého prírodného kameniva (Coarse Natural Aggregate – CNA) recyklovaným, pričom bola zisťovaná šmyková odolnosť proti pretlačeniu. Dosky boli vyrábané v troch sériách - každá séria obsahovala referenčnú dosku, v ktorej bol uvažovaný betón bez recyklovaného kameniva, druhá doska obsahovala 50 % náhradu CNA a v betóne tretej dosky bolo všetko CNA nahradené recyklovaným. Tri série dosiek sa odlišujú rozdielnym stupňom vystuženia ohybovou výstužou - 0,53 %, 1,23 % a 1,53 %. Všetky dosky boli bez šmykovej výstuže.

2.1 Skúšobné vzorky

Betónové vzorky mali rozmer 2,50 x 2,50 m a hrúbku 25 cm. Hlavnú ohybovú výstuž tvorili pri prvej sérii prúty priemeru 12 mm v osovej vzdialenosti 100 mm ($\rho_l \approx 0{,}53$ %), pri druhej sérii prúty priemeru 20 mm v rastri po 125 mm ($\rho_l \approx 1{,}23$ %) a tretia séria obsahovala prúty priemeru 20 mm v rastri po 100 mm ($\rho_l \approx 1{,}53$ %). Spodnú a konštrukčnú výstuž dosky dopĺňali prúty priemeru 10 mm.

Obr. 1: Tvar a vystuženie dosiek
(vľavo hore – S1, vpravo hore – S2, vľavo dole – S3, vpravo dole – vybetónovaná vzorka)

2.2 Použité materiály

Na výrobu vzoriek bola prebratá receptúra zo spolupráce na medzinárodnom projekte HORIZON-INFRA-2021-SERV-01-07:Structural Behaviour of Recycled Aggregate Reinforced Concrete Flat Slabs with Drop Panels under Seismic and Cyclic Actions (ERIES). V receptúre jednotlivých dosiek sa menilo iba množstvo hrubého recyklovaného kameniva (Coarse recycled aggregate – CRA). Použitý bol cement CEM II/A- L 42.5 R, ktorý má 6 - 20 % slinku nahradeného vápencom, vďaka čomu je ekologickejší.

CRA ovplyvňuje vlastnosti betónu vyrobeného z CRA, ako sú napríklad zvýšenie pórovitosti a nasiakavosti betónu či zníženie objemovej hmotnosti RAC. Pri porovnaní mechanických vlastností, Tab. 1 ukazuje, že v niektorých prípadoch náhrady CNA recyklovaným valcová a kocková pevnosť betónu v tlaku narástla a v niektorých poklesla – CRA podľa týchto dát nemá jasne negatívny

či pozitívny vplyv na pevnosť betónu. V prípade modulu pružnosti betónu sa dá konštatovať, že CRA negatívne vplýva na tento parameter. Pri 50 % náhrade CRA poklesol modul pružnosti v priemere o 10 % a pri 100 % náhrade je pokles v priemere o 18 %.

Tab. 1: Mechanické vlastnosti použitých materiálov

DOSKA	ÚROVEŇ NÁHRADY CNA	BETÓN				BETONÁRSKA VÝSTUŽ		
		ρ_c [kg/m^3]	$f_{cm,cyl}$ [MPa]	$f_{cm,cube}$ [MPa]	E_{cm} [GPa]	ϕ [mm]	f_{ym} [MPa]	f_{tm} [MPa]
S1.0	0 %	2389	39,6	51,3	38,8	12	601	728
S1.1	50 %	2254	33,2	43,2	31,6			
S1.2	100 %	2248	33,4	44,3	29,1			
S2.0	0 %	2286	30,8	37,0	34,5	20	545	633
S2.1	50 %	2266	34,0	44,9	33,6			
S2.2	100 %	2241	33,7	46,5	29,3			
S3.0	0 %	2302	35,8	47,2	36,7			
S3.1	50 %	2254	33,6	43,8	32,9			
S3.2	100 %	2209	35,9	47,0	31,2			

2.3 Skúšky dosiek v laboratóriu

Všetky dosky boli vyrábané v závode STRABAG s. r. o. v Seredi, odkiaľ boli prevezené a následne skúšané v Centrálnom laboratóriu STU v Bratislave. Skúšobná zostava pozostávala z hydraulického lisu, ktorým bola cez platňu rozmeru 300 x 300 mm (série dosiek S1 a S2) a 200 x 200 mm (dosky série S3) vnášaná sila do dosky. Doska bola kotvená z hornej strany pomocou kalot a oceľových platní prostredníctvom predpících tyčí do masívnej betónovej podlahy laboratória (viď. Obr. 2). Počas skúšok boli merané deformácie pomocou LVDT snímačov na spodnom aj hornom povrchu dosky. Deformácie boli overované pomocou analogických výchylkomerov a fotogrametrie. Pootočenia dosky boli merané analogickými inklinometrami (libelami) na 4 stranách dosky.

Obr. 2: Skúšobná zostava dosiek

2.4 Výsledky experimentov

Všetky dosky boli porušené na šmyk. Po ich porušení a následnom prerezaní bola meraná skutočná účinná výška prierezu (v strede dosky) a tvar a sklon rozhodujúcej šmykovej trhliny (viď. Obr. 3). Polohu hlavnej výstuže bolo obtiažné dodržať, pretože hlavná ťahová výstuž sa pri betonáži nachádzala pri hornom povrchu (rovnako ako v praxi). Dĺžky základného kontrolného obvodu vo vzdialenosti 0,5 d_v od líca podpery a stupeň vystuženia boli vypočítané s použitím skutočne nameranej účinnej výšky jednotlivých dosiek.

Obr. 3: Prerezané porušené vzorky (hore - S3.1, dole – S3.2)

Tab. 2: Výsledky experimentov

DOSKA	ÚROVEŇ NÁHRADY CNA	d [mm]	$h^S = b^{S*}$ [mm]	$b_{0.5}$ [m]	ρ_l [%]	f_{cm} [MPa]	$V_{R,test}$ [kN]
S1.0	0 %	210	300	1,860	0,539	39,6	838,9
S1.1	50 %	210		1,860	0,539	33,2	849,3
S1.2	100 %	213		1,869	0,531	33,4	846,8
S2.0	0 %	202		1,835	1,244	30,8	1000,0
S2.1	50 %	201		1,831	1,244	34,0	1003,7
S2.2	100 %	202		1,835	1,250	33,7	1034,7
S3.0	0 %	200	200	1,428	1,571	35,8	855,7
S3.1	50 %	197		1,419	1,595	33,6	900,2
S3.2	100 %	199		1,425	1,579	35,9	904,8

* dĺžka hrán štvorcového stĺpa (oceľovej platne)

Kvôli odlišným hodnotám pevností betónov a účinným výškam bolo potrebné pre korektné porovnanie výsledkov hodnoty šmykových odolností normalizovať. V Tab. 3 sú v štvrtom stĺpci výsledky normalizované podľa dĺžky kontrolného obvodu, účinnej výšky a tretej odmocniny pevnosti betónu v tlaku. Šiesty stĺpec rozširuje normalizované výsledky o hodnoty tretej odmocniny stupňa vystuženia.

Tab. 3: Porovnanie normalizovaných výsledkov experimetnov

DOSKA	ρ_l [%]	$V_{R,test}$ [kN]	$V_{R,norm,A}$ [MPa$^{2/3}$]	$V_{R,norm,A,i}$ / $V_{R,norm,A,1}$	$V_{R,norm,B}$ [MPa$^{2/3}$]	$V_{R,norm,B,i}$ / $V_{R,norm,B,1}$
S1.0	0,539	838,9	0,630	1	0,775	1
S1.1	0,539	849,3	0,677	1,074	0,832	1,074
S1.2	0,531	846,8	0,661	1,048	0,816	1,053
S2.0	1,244	1000,0	0,861	1	0,800	1
S2.1	1,244	1003,7	0,842	0,978	0,781	0,976
S2.2	1,250	1034,7	0,865	1,004	0,804	1,004
S3.0	1,571	855,7	0,909	1	0,782	1
S3.1	1,595	900,2	0,998	1,098	0,854	1,093
S3.2	1,579	904,8	0,967	1,064	0,831	1,062

$V_{R,norm,A,i}$ je normalizovaná hodnota šmykovej odolnosti získaná ako $V_{R,test,i} / d \,.b_{0,5} \,.(f_{cm})^{1/3}$

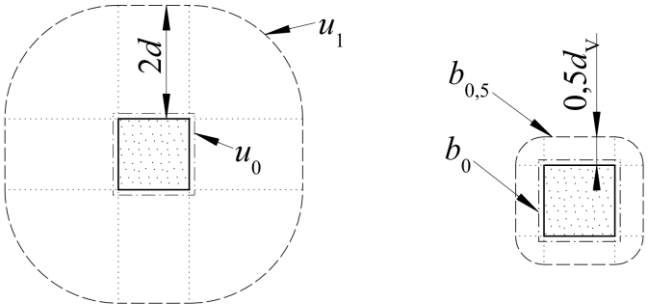
$V_{R,norm,B,i}$ je normalizovaná hodnota šmykovej odolnosti získaná ako $V_{R,test,i} / d \,.b_{0,5} \,.(\rho_l \,.f_{cm})^{1/3}$

Z výsledkov vyplýva, že okrem vzorky S2.1, všetky dosky z CRAC dosiahli vyššiu šmykovú odolnosť ako referenčné dosky v danej sérii bez ohľadu na pevnosť betónu, účinnú výšku či geometrie podpery. Posledný stĺpec Tab. 3 ukazuje, že mierny rozdiel v stupni vystuženia nemal takmer žiadny vplyv na zmenu šmykovej odolnosti dosiek z CRAC voči referenčným doskám.

Pri normalizovaných hodnotách šmykovej odolnosti všetkých deviatich dosiek s normalizáciou podľa stupňa vystuženia ohybovou výstužou (predposledný stĺpec v Tab. 3) dosahuje koeficient variácie CoV = 0,034, čo dokazuje, že všetky dosky, bez ohľadu na množstvo ohybovej výstuže, dosiahli podobnú úroveň šmykového namáhania pri porušení.

3. Predikcie šmykovej odolnosti proti pretlačeniu podľa návrhových postupov

Odlišnosť vo výpočtových postupoch je najmä v tom, do akej miery dokážu vystihnúť vplyv parametrov, ktoré tvoria skutočnú odolnosť danej konštrukcie, ako napríklad mechanické vlastnosti materiálov, množstvo výstuže, geometria podpery či rozmery samotnej konštrukcie. Ďalší rozdiel je v použiteľnosti výpočtového postupu v praxi, kde je často uprednostnený jednoduchší a praktickejší (s dostatočnou mierou bezpečnosti) pred komplikovanejším. Mieru bezpečnosti, a teda mieru presnosti predikcií je možné vyčísliť porovnaním predikovaných výsledkov a výsledkov experimentov. V tomto príspevku je porovnávaný výpočet šmykovej odolnosti proti pretlačeniu podľa súčasne platného Eurokódu 2 (EC2-04) [1] , druhej generácie Eurokódu 2 (EC2-23) [2], výpočet podľa teórie kritickej šmykovej trhliny (Critical Shear Crack Theory – CSCT) [3] od Muttoniho a podľa upravenej CSCT použitej v Model Code 2010 (MC10) [4]. Všetky tieto výpočtové postupy v určitej miere zohľadňujú množstvo ohybovej výstuže pre výpočet šmykovej odolnosti proti pretlačeniu bez šmykovej výstuže. Dĺžky uvažovaných základných kontrolných obvodov sú zobrazené na Obr. 4. Vo všetkých výpočtových postupoch boli parciálne súčinitele spoľahlivosti uvažované s hodnotou 1,0.



Obr. 4: Uvažované dĺžky základného kontrolného obvodu (vľavo – EC2-04, vpravo EC2-23, CSCT, MC10)

3.1 EN 1992-1-1:2004 (EC2-04)

Vzťah pre výpočet šmykovej odolnosti proti pretlačeniu podľa EC2-04 (1) je veľmi empirický, kalibrovaný podľa veľkého množstva experimentov, vďaka čomu je pomerne presný a spoľahlivý a práve preto je tiež často spomínaný a používaný vo významných publikáciách zameraných na šmykovú odolnosť proti pretlačeniu lokálne podopretých dosiek.

$$V_{\mathrm{Rd,c}} = C_{\mathrm{Rd,c}} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{\mathrm{ck}})^{1/3} \cdot u_1 \cdot d \geq V_{\mathrm{min}} \tag{1}$$

kde $C_{\mathrm{Rk,c}} = 0.18/\gamma_{\mathrm{C}}$, $k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2$ je súčiniteľ zohľadňujúci vplyv účinnej výšky dosky na šmykovú pevnosť (size effect) (d v mm), $\rho = \sqrt{\rho_{lz} \cdot \rho_{ly}} \leq 0.02$ je stupeň vystuženia ťahanou ohybovou výstužou, f_{ck} je valcová pevnosť betónu (v MPa), u_1 je základný kontrolný obvod vo vzdialenosti $2d$ od líca podpery, d je účinná výška dosky.

$$V_{\mathrm{min}} = 0{,}035 \cdot k^{1,5} \cdot \sqrt{f_{\mathrm{ck}}} \cdot u_1 \cdot d \tag{2}$$

3.2 Teória kritickej šmykovej trhliny (CSCT)

Táto teória predpokladá, že porušenie dosky nastáva v jednej šmykovej trhline, ktorá sa označuje ako kritická. Táto trhlina vzniká pôsobením tlakovej diagonály v blízkosti stĺpa, cez ktorú sú prenášané šmykové sily do podpery. Šmyková odolnosť je podľa tejto teórie kontrolovaná šírkou trhliny (jej otvorením od pootočenia dosky) a drsnosťou povrchov v trhline. Pri CSCT poznáme 4 stupne aproximácie (Level of Approximation - LoA), pomocou ktorých môžeme s požadovanou presnosťou určiť šmykovú odolnosť (3). Kým LoA I zahŕňa jednoduché a rýchle metódy výpočtu, s narastajúcou úrovňou aproximácie sa zvyšuje presnosť výsledku. V tejto práci je použitý LoA III, ktorý je uvedený vo vzorci (5).

$$V_{\mathrm{Rd,c}} = k_{\psi} \cdot \sqrt{f_{\mathrm{ck}}} \cdot \; b_{0,5} \cdot d_{\mathrm{V}} \tag{3}$$

$$k_{\psi} = \frac{0{,}75}{1 + 15 \cdot \dfrac{\psi \cdot d_{\mathrm{v}}}{16\,mm + d_{\mathrm{g}}}} \leq 0{,}6 \tag{4}$$

$$\psi = 1{,}2 \cdot \frac{r_{\mathrm{s}}}{d_{\mathrm{v}}} \frac{f_{\mathrm{y}}}{E_{\mathrm{s}}} \cdot \left(\frac{m_E}{m_R}\right)^{1{,}5} \tag{5}$$

kde k_{ψ} je parameter závislý od pootočenia dosky, počítaný podľa (4), d_{g} je maximálne zrno kameniva použité v betóne, ψ je spojené s pootočením dosky okolo podpory podľa (5) a jeho hodnota závisí na stupni aproximácie, r_{s} reprezentuje vzdialenosť ťažiska podpery od miest nulových momentov na doske, f_{y} je hodnota návrhovej medze klzu ohybovej výstuže, E_{s} je modul pružnosti výstuže, m_{E} je priemerný ohybový moment v podpere počítaný podľa lineárne elastického modelu, m_{R} je ohybová kapacita dosky, $d_{\mathrm{v}} = (d_{\mathrm{vx}} + d_{\mathrm{vy}})/2$ je účinná výška dosky v šmyku, $b_{0,5}$ je dĺžka kontrolného obvodu vo vzdialenosti $0{,}5d$ od líca podpery.

3.3 Model Code 2010 (MC10)

Vzťah pre Model Code 2010 je vo svojej podstate iba upravený model CSCT. Muttoni kvôli zvýšeniu úrovne bezpečnosti upravil kritérium porušenia (6) na 5% fraktil, čo prináša viac konzervatívne výsledky [5]. Šmyková odolnosť sa počíta rovnako ako pri CSCT, podľa vzťahu (3).

$$k_{\psi} = \frac{1}{1{,}5 + 0{,}9 \cdot \; k_{\mathrm{dg}} \psi d} \quad \leq 0{,}6 \tag{6}$$

kde k_{dg} je súčiniteľ závislý od maximálneho zrna kameniva $d_{\mathrm{g,max}}$ [mm], $k_{\mathrm{dg}} = 32/(16 + d_{\mathrm{g,max}})$.

3.4 Druhá generácia Eurokódu 2 (EC2-23)

Vzťah na výpočet šmykovej odolnosti proti pretlačeniu (7) rovnako vychádza z CSCT, je to teda mechanický model, je však upravený, aby mal praktickejšie použitie v praxi.

$$V_{\mathrm{Rd,c}} = \frac{0{,}6}{\gamma_{\mathrm{V}}} \cdot k_{\mathrm{pb}} \cdot \left(100 \cdot \rho_{\mathrm{l}} \cdot f_{\mathrm{ck}} \cdot \frac{d_{\mathrm{dg}}}{a_{\mathrm{pd}}}\right)^{1/3} \cdot b_{0,5} \cdot d_{\mathrm{V}} \; \leq \frac{0{,}5}{\gamma_{\mathrm{V}}} \cdot \sqrt{f_{\mathrm{ck}}} \cdot \; b_{0,5} \cdot d_{\mathrm{V}} \tag{7}$$

kde k_{pb} je koeficient zvyšujúci šmykovú pevnosť proti pretlačeniu počítaný podľa rovnice (8), d_{dg} je parameter veľkosti kameniva zohľadňujúci drsnosť v zóne porušenia, d_{dg} = 16 mm + $d_{g,max}$, d_v = (d_{vx} + d_{vy})/2 je účinná výška dosky v šmyku, b_0 je dĺžka obvodu teoretickej podpery (stĺpa), $b_{0,5}$ je dĺžka kontrolného obvodu vo vzdialenosti 0,5d od líca podpery.

$$1 \leq k_{pb} = 3{,}6 \cdot \sqrt{1 - \frac{b_0}{b_{0,5}}} \leq 2{,}5 \qquad (8)$$

Súčiniteľ a_{pd} nahrádza v zátvorke vo vzťahu (7) parameter d_v, pretože platí, že vzdialenosť ťažiska podpery od miest nulových momentov na doske (a_p) je menej ako 8d_v. a_{pd} počítame ako (a_p*d_v/8)$^{1/2}$.

4. Porovnanie predikovaných šmykových odolností a výsledkov z experimentov

V Tab. 4 sú porovnané experimentálne získané šmykové odolnosti proti pretlačeniu jednotlivých dosiek s predikciami podľa výpočtových postupov.

Tab. 4: Porovnanie predikcií šmykovej odolnosti proti pretlačeniu a výsledkov experimentov

DOSKA	$V_{R,test}$	$V_{R,pred}$ [kN]				$V_{R,test}$ / $V_{R,pred}$			
	[kN]	EC2-04	EC2-23	CSCT	MC10	EC2-04	EC2-23	CSCT	MC10
S1.0	838,9	794,9	788,5	810,8	705,3	1,06	1,06	1,03	1,19
S1.1	849,3	749,5	743,5	769,7	669,9	1,13	1,14	1,10	1,27
S1.2	846,8	762,9	757,6	784,7	682,8	1,11	1,12	1,08	1,24
S2.0	1000,0	914,0	904,1	955,7	835,0	1,09	1,11	1,05	1,20
S2.1	1003,7	939,5	929,0	984,2	859,7	1,07	1,08	1,02	1,17
S2.2	1034,7	941,8	931,7	987,2	862,4	1,10	1,11	1,05	1,20
S3.0	855,7	913,6	894,5	904,4	792,4	0,94	0,96	0,95	1,08
S3.1	900,2	878,8	859,8	864,5	757,5	1,02	1,05	1,04	1,19
S3.2	904,8	909,1	889,9	899,3	787,9	1,00	1,02	1,01	1,15
					priemer:	1,06	1,07	1,04	1,19
					štandardná odchýlka:	0,061	0,057	0,043	0,054
					koeficient variácie (CoV):	0,057	0,053	0,041	0,045

Výsledky ukazujú, že prvá aj druhá generácia Eurokódu 2 dosahuje veľmi dobré zhody s experimentami s priemernou hodnotou bezpečnosti 1,06 a priemerným koeficientom variácie CoV = 0,055. Najlepšiu zhodu s experimentami však dosahuje návrhový postup podľa CSCT s koeficientom variácie CoV = 0,041, čo znamená malý rozptyl porovnávaných výsledkov. Model Code 2010 udáva najvyššiu úroveň bezpečnosti na úrovni 1,19, čo značí, že predikované šmykové odolnosti sú veľmi konzervatívne.

Druhá generácia Eurokódu 2 v prílohe N v tabuľke N.1 prináša redukčný súčiniteľ η_τ , ktorý zohľadňuje prítomnosť betónového recyklovaného kameniva v betóne. Tento súčiniteľ je závislý od množstva náhrady CNA recyklovaným a jeho hodnota je ohraničená rozmedzím 0,8 ~ 1,0. Norma povoľuje použitie súčiniteľa len pre základné vzťahy na výpočet jednosmerného šmyku, nevyjadruje sa však k použitiu tohto súčiniteľa na výpočet šmykovej odolnosti proti pretlačeniu lokálne podopretých dosiek bez šmykovej výstuže. Je preto otázne, či je v praxi možné tento súčiniteľ použiť aj pre tento výpočet. S receptúrou použitou pri experimentoch má súčiniteľ η_τ hodnotu 0,943 a 0,885 pre 50 %, resp. 100 % náhradu CNA, čo navyšuje úroveň bezpečnosti o 6 a 13 % vo výpočtoch podľa EC2-23. Tento súčiniteľ preto nie je uvažovaný v tomto príspevku.

5. Záver

Výsledky experimentálneho programu ukazujú, že prítomnosť CRA v betóne môže rôzne vplývať na pevnosť betónu, RAC však vždy dosahoval nižší modul pružnosti v porovnaní s betónom z CNA. Zmena mechanických vlastností betónu nemala negatívny vplyv na šmykovú odolnosť dosiek proti pretlačeniu. Pri porovnávaní jednotlivých sérií dosiek je zrejmé, že vyšší stupeň vystuženia ohybovou výstužou má pozitívny vplyv na šmykovú odolnosť a zarátanie tohto parametra pod treťou odmocninou je vhodná interpretácia vplyvu stupňa vystuženia ohybovou výstužou.

Pri porovnaní experimentov a predikcií šmykových odolností proti pretlačeniu dosahujú návrhové postupy podľa prvej, druhej generácie Eurokódu 2 a CSCT relatívne presné výsledky s primeranou úrovňou bezpečnosti. Model Code 10 dosahuje dobrú presnosť s výsledkami experimentov, hodnota bezpečnosti predikcií je však voči experimentom na úrovni 1,19, čo sa javí ako konzervatívna hodnota.

Poďakovanie

Táto práca bola podporená a financovaná EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I03-03-V05-00005 a agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-23-0193 a za podpory Vedeckej Grantovej Agentúry Ministerstva školstva, vedy a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied číslo VEGA č. 1/0185/25.

This work is part of the transnational access project “ERIES – RecycleSlab” (Structural Behaviour of Recycled Aggregate Reinforced Concrete Flat Slabs with Drop Panels under Seismic and Cyclic Actions), supported by the Engineering Research Infrastructures for European Synergies (ERIES) project (www.eries.eu).

Autor tiež ďakuje firme A-Z Stav s r. o. za poskytnuté recyklované kamenivo, firme Danucem Slovensko a.s. za poskytnutý cement a firme Strabag, Pozemné a inžinierske staviteľstvo s.r.o. za výrobu vzoriek.

Literatúra

[1] EN 1992-1-1: Navrhovanie betónových konštrukcií – Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy. 2004

[2] EN 1992-1-1: Navrhovanie betónových konštrukcií – Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy, mosty a inžinierske konštrukcie. 2023

[3] MUTTONI, A. – RUIZ, M. F.: Shear Strength of Members without Transverse Reinforcement as Function of Critical Shear Crack Width. ACI Structural Journal, 105, 2008, 163-172

[4] Fédération Internationale du Béton (fib), Model Code 2010 - Final draft, Vol. 1, Fédération Internationale du Béton, Bulletin 65, Lausanne, Switzerland, 2012, Vol. 2.

[5] MUTTONI, A. – RUIZ, M. F.: The levels-of-approximation approach in MC 2010: applications to punching shear provisions, Structural Concrete, Ernst & Sohn, Germany, 13, No. 1, 2012, 32-41

Zuzana Haššová[1]
Študijný program: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: 3.

VPLYV SÚDRŽNOSTI PREDPÍNACÍCH LÁN NA CELKOVÉ PÔSOBENIE VOPRED PREDPÄTÝCH NOSNÍKOV

INFLUENCE OF BOND OF PRESTRESSING STRANDS ON THE BEHAVIOUR OF PRE-TENSIONED BEAMS

Abstract
This paper investigates the influence of bond of prestressing strands on the overall behaviour of pre-tensioned concrete beams using non-linear finite element analysis. The study compares models with two different prestressing strand strengths. Bond degradation, simulating conditions such as corrosion, was modelled by progressively reducing the maximum bond stress in steps from 100 % down to 20 %. The results show that reduced bond significantly affects crack development, leading to wider cracks and larger spacing, particularly for the 2460 MPa strands. While the ultimate capacity remained relatively unchanged, a critical finding was the change in failure mode. At low bond levels (40% and 20%), the failure shifted from ductile to brittle, as the strands failed to reach their proof strength. This highlights that sufficient bond is essential not only for load transfer but also for ensuring the ductile response of prestressed members.

Kľúčové slová / Key Words
Súdržnosť; predpätie; nelineárna analýza; korózia.

1. Úvod

V posledných rokoch sa pozornosť výskumu čoraz viac sústreďuje na využitie vysokopevnostných predpínacích výstuží s pevnosťou v ťahu vyššou ako 1860 MPa, konkrétne až do pevnosti 2400 MPa. Tieto nové materiály umožňujú efektívnejšie predpätie, zníženie počtu lán a optimalizáciu dimenzií konštrukcií. Súčasne sa však vznikajú otázky týkajúce sa pôsobenia nosníkov z hľadiska prenosu napätí, únosnosti a spolupôsobenia s betónom.

Moje doterajšie výskumné aktivity boli primárne zamerané na analýzu pôsobenia predpätých betónových prvkov s využitím vysokopevnostnej predpínacej ocele a na posúdenie faktorov, ktoré ovplyvňujú ich mechanickú odozvu. V rámci numerických analýz bol sledovaný vplyv súčiniteľa duktility k, definovaného ako pomer pevnosti v ťahu k dohovorenej medze klzu, pričom rôzne hodnoty k mali preukázateľný vplyv na deformácie, ale aj na veľkosť maximálne pôsobiacej sily. Ďalšou oblasťou môjho výskumu bolo hodnotenie duktilného pôsobenia prvkov vystužených predpínacími lanami s pevnosťou v ťahu f_{pk}=1860 MPa. Do analýz bol zahrnutý aj vplyv korózie predpínacej výstuže, pričom degradácia materiálu bola reprezentovaná redukciou plastickej vetvy pracovného diagramu. Takto definované zhoršenie duktility umožnilo zachytiť zmeny v napäťovo-deformačnom pôsobení konštrukcie pri rôznych úrovniach korózneho poškodenia. Súčasne som sa venovala aj problematike vplyvu veľkosti počiatočného napätia v predpínacej výstuži, ktoré sa ukázalo ako významný parameter ovplyvňujúci celkové pôsobenie nosníkov, ich rezervu únosnosti a charakter porušenia.

[1] Zuzana, Haššová, Ing., Slovenská technická univerzita, Stavebná fakulta, Katedra betónových konštrukcií a mostov, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

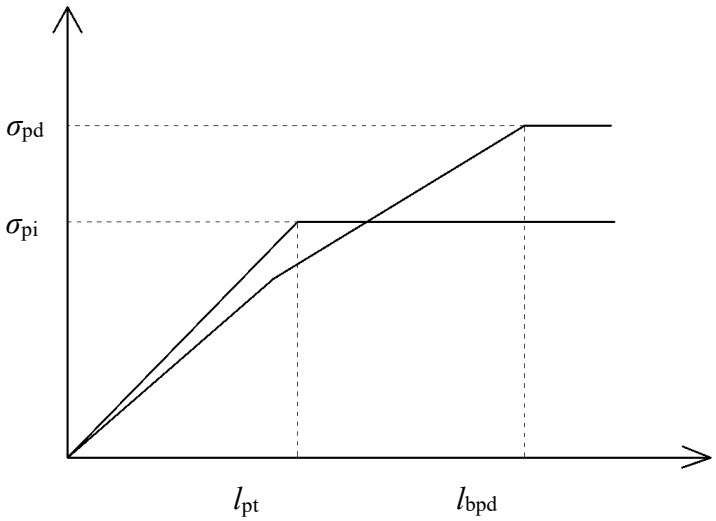
Na predchádzajúce poznatky nadväzuje aj moja súčasná práca, v ktorej sa zameriavam na pôsobenie predpätých betónových prvkov so zohľadnením úrovne súdržnosti medzi predpínacími lanami a betónom. Analýzy sú zamerané na hodnotenie vplyvu veľkosti pevnosti v súdržnosti pri dvoch rôznych pevnostiach v ťahu predpínacích lán. Cieľom je porovnať odozvu konštrukcie pri týchto variantoch a definovať vzťah medzi úrovňou súdržnosti, napäťovo-deformačným stavom a celkovým pôsobením nosníkov.

2. Súdržnosť

Súdržnosť predstavuje kľúčový parameter pri prenose tlakových a ťahových napätí medzi betónom a výstužou. Ide o súhrn všetkých účinkov, ktoré umožňujú spoločnú deformáciu, pričom každý parameter je závislý od povrchovej úpravy, ale podiel ich vplyvu na súdržnosť je rôzny [2]. Vo všeobecnosti hovoríme o troch základných účinkoch:

- priľnavosť alebo adhézia;
- trenie;
- zaklinenie.

Očakávaným charakterom porušenia výstuže je jej pretrhnutie, ktoré sa zabezpečí zabetónovaním výstuže na dostatočnú dĺžku. V predpätých betónových prvkoch sú prenosová dĺžka l_{pt} a kotevná dĺžka l_{bpd} (Obrázok 1) kľúčové parametre pre zaistenie účinného a bezpečného prenosu predpínacej sily z výstuže do betónu. Prenosová dĺžka predstavuje úsek od miesta ukotvenia, na ktorom sa napätie z predpínacej výstuže postupne prenesie do betónu. Významný vplyv má tzv. Hoyerov efekt, ktorý vzniká po uvoľnení lana – priečne roztiahnutie spôsobí „zaklinenie“ výstuže v betóne, čím sa zvyšuje prenosová účinnosť. Kotevná dĺžka je minimálna potrebná dĺžka, na ktorej sa pri medzných stavoch únosnosti v štádiu užívania prvku prenesie do betónu návrhová hodnota predpínacej sily.



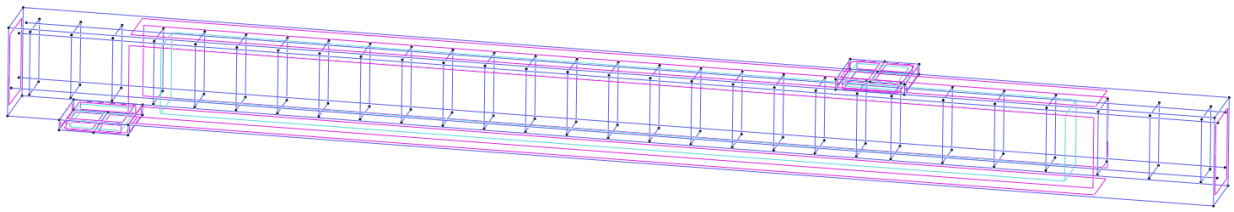
Obrázok 1: Prenosová a kotevná dĺžka [1]

3. Nelineárna analýza

Na preukázanie vplyvu súdržnosti na celkové pôsobenie betónových konštrukcií bola použitá numerická parametrická analýza, pri ktorej premennou vlastnosťou bola rôzna úroveň pevnosti v súdržnosti. Na analýzu bol použitý softvér Atena, ktorý je založený na metóde konečných prvkov. Model bol vytvorený tak, aby realisticky zachytával interakciu medzi betónom a predpínacou výstužou prostredníctvom väzby typu bond–slip, ktorá opisuje vzťah medzi pevnosťou v súdržnosti

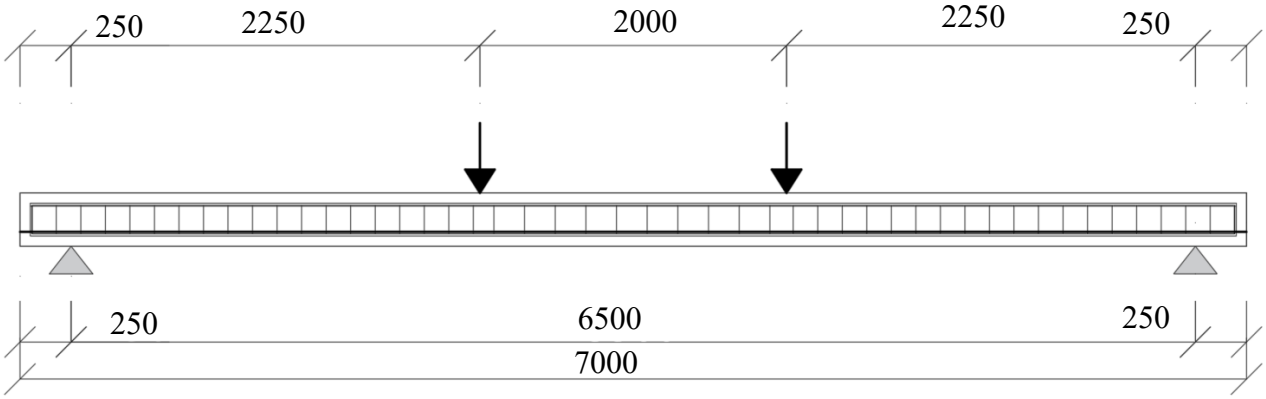
a relatívnym poklzom medzi lanom a betónom (Obrázok 2). Znižovaním maximálnej hodnoty napätia v súdržnosti τ_{max} boli simulované rôzne úrovne degradácie súdržnosti, reprezentujúce možné poruchové stavy – od plne súdržného stavu až po výrazne oslabené spojenie v dôsledku korózie.

Predpínacie laná boli v modeli reprezentované vloženými prútovými prvkami. Pre nelineárnu analýzu sa s cieľom zníženia výpočtového času pri zachovaní presnosti využila symetria konštrukcie a preto sa modelovala len polovica nosníka. Zaťaženie bolo aplikované podľa schémy štvorbodovej zaťažovacej skúšky (Obrázok 3), čo zabezpečilo konštantný ohybový moment v strednej časti nosníka a umožnilo presné stanovenie jeho ohybovej odolnosti. Predpätý betónový nosník bol vyrobený z betónu triedy C45/55. Pre numerickú analýzu sa namiesto charakteristických hodnôt použili stredné hodnoty pevnosti pre betón aj výstuž. V numerickej analýze bol použitý nelineárny model betónu CC3DNonLinCementitious2, pretože poskytuje realistické zobrazenie pôsobenia betónu v ťahu aj v tlaku. Predpínacia výstuž pozostávala zo sedemdrôtových lán s dvomi rôznymi charakteristickými pevnosťami v ťahu – 1860 a 2460 MPa (Tabuľka 1), pričom charakteristické hodnoty boli následne prepočítané na stredné hodnoty. Modul pružnosti lán bol uvažovaný ako E_p=195 GPa, pracovný diagram lán bol modelovaný ako bilineárny. Betonárska výstuž bola uvažovaná s pevnosťou B500B.



Obrázok 2: Zaťažovaný nosník

Na overenie ohybovej odolnosti a duktilného pôsobenia je navrhnutý nosník, ktorý má obdĺžnikový prierez s rozmermi 200 x 260 mm, dĺžky 7 m. Schéma je zobrazená na Obrázku 3. Vystuženie je tvorené dvojicou pozdĺžnych prútov ϕ 14 mm umiestnených pri hornom povrchu. Predpätie tvorí dvojica predpínacích lán, s nominálnym priemerom ϕ 15,7 mm a prierezovou plochou 150 mm^2, umiestnených v spodnej časti prierezu. V celom priereze je doplnená šmyková výstuž tvorená dvoj-strižnými strmeňmi priemeru 8 mm s osovou vzdialenosťou 120 mm pri podpere a 150 mm v strede rozpätia.



Obrázok 3: Statická schéma skúšaného nosníka

Cieľom analýzy bolo sledovať, ako zníženie súdržnosti ovplyvňuje pôsobenie konštrukcie z hľadiska vzniku a šírenia trhlín, šírky trhlín, priehybov, ako aj efektívneho prenosu predpínacej sily. Výsledky umožňujú lepšie porozumieť interakcii medzi lanom a betónom a kvantifikovať vplyv straty súdržnosti na celkové pôsobenie predpätých prvkov, čo je dôležité pri hodnotení existujúcich

mostných konštrukcií s prejavmi korózie alebo degradačných procesov.

Tabuľka 1: Vstupné parametre pre nelineárnu analýzu

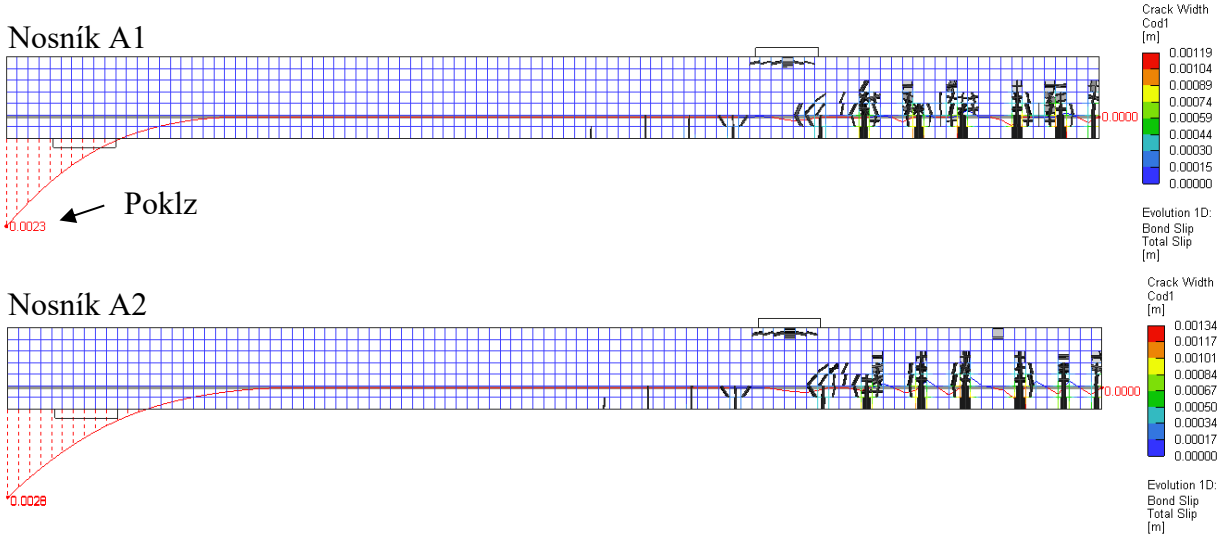
	f_{pk} [MPa]	Súdržnosť [%]	Súdržnosť [MPa]
Nosník A1/B1	1860 / 2460	100	10,458
Nosník A2/B2		80	8,366
Nosník A3/B3		60	6,275
Nosník A4/B4		40	4,183
Nosník A5/B5		20	2,091

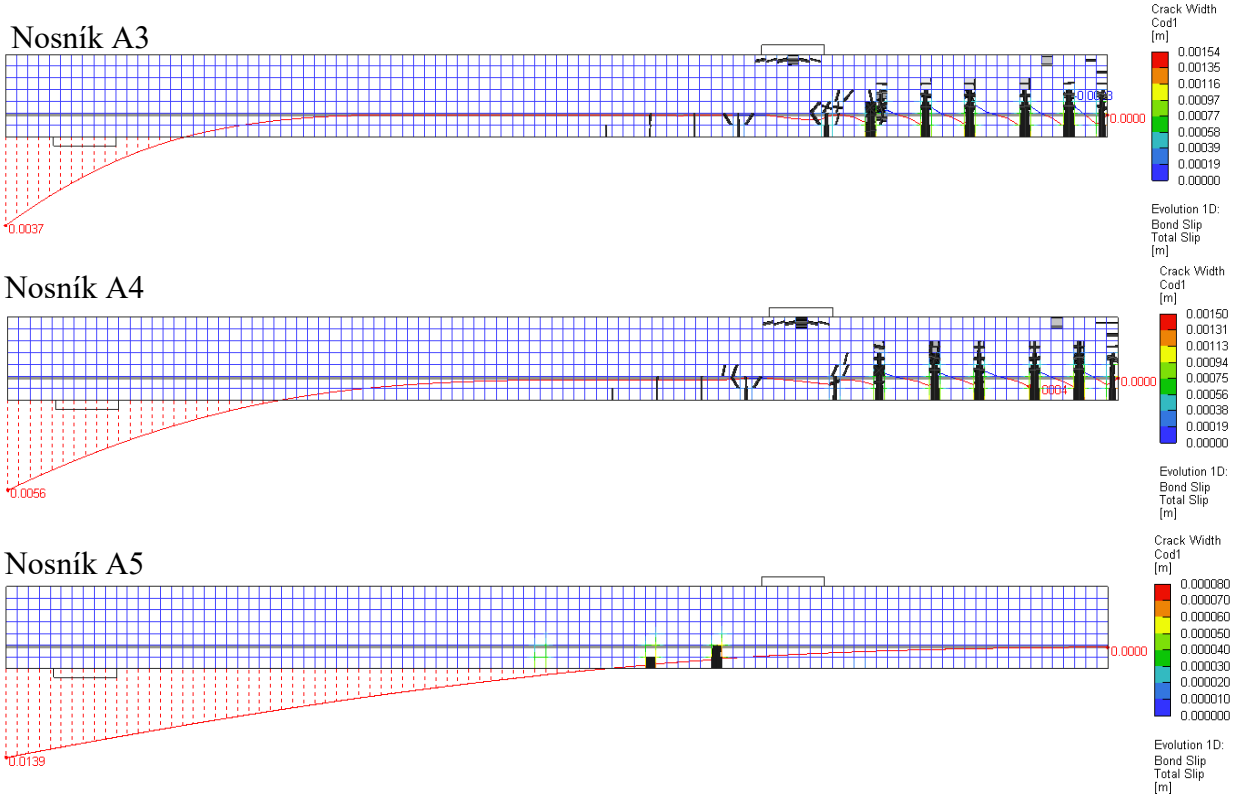
4. Výsledky a diskusia

Výsledky nelineárnej analýzy potvrdili, že úroveň súdržnosti medzi predpínacou výstužou a betónom má zásadný vplyv predovšetkým na vznik a šírku trhlín, zatiaľ čo vplyv na celkovú deformáciu a pôsobiace sily bol relatívne malý. Analýza bola vykonaná na dvoch skupinách modelov predpätých nosníkov – v prvej skupine s predpínacími lanami s pevnosťou v ťahu 1860 MPa a v druhej skupine s lanami s pevnosťou v ťahu 2460 MPa. V každej skupine bolo analyzovaných päť variantov nosníkov, pričom úroveň súdržnosti bola postupne znižovaná.

Z výsledkov vyplýva, že pri znížení súdržnosti sa nezmenila významne celková tuhosť nosníka ani priebeh zaťažovacej krivky (Obrázok 8), avšak došlo k výrazným zmenám v rozvoji trhlín. S rastúcou mierou oslabenia súdržnosti sa pozorovalo zväčšovanie šírky trhlín. Pri nižších úrovniach súdržnosti sa menila aj vzdialenosť trhlín – vzdialenosť medzi nimi sa zvyšovala, výraznejšie to bolo pozorovateľné pri nosníkoch vystužených lanami s pevnosťou v ťahu 2460 MPa. Tento jav súvisí s obmedzenou schopnosťou lana prenášať napätia do betónu v jeho okolí, keďže pri nižšej súdržnosti dochádza k väčšiemu lokálnemu poklzu a k predĺženiu prenosovej dĺžky predpínacej výstuže.

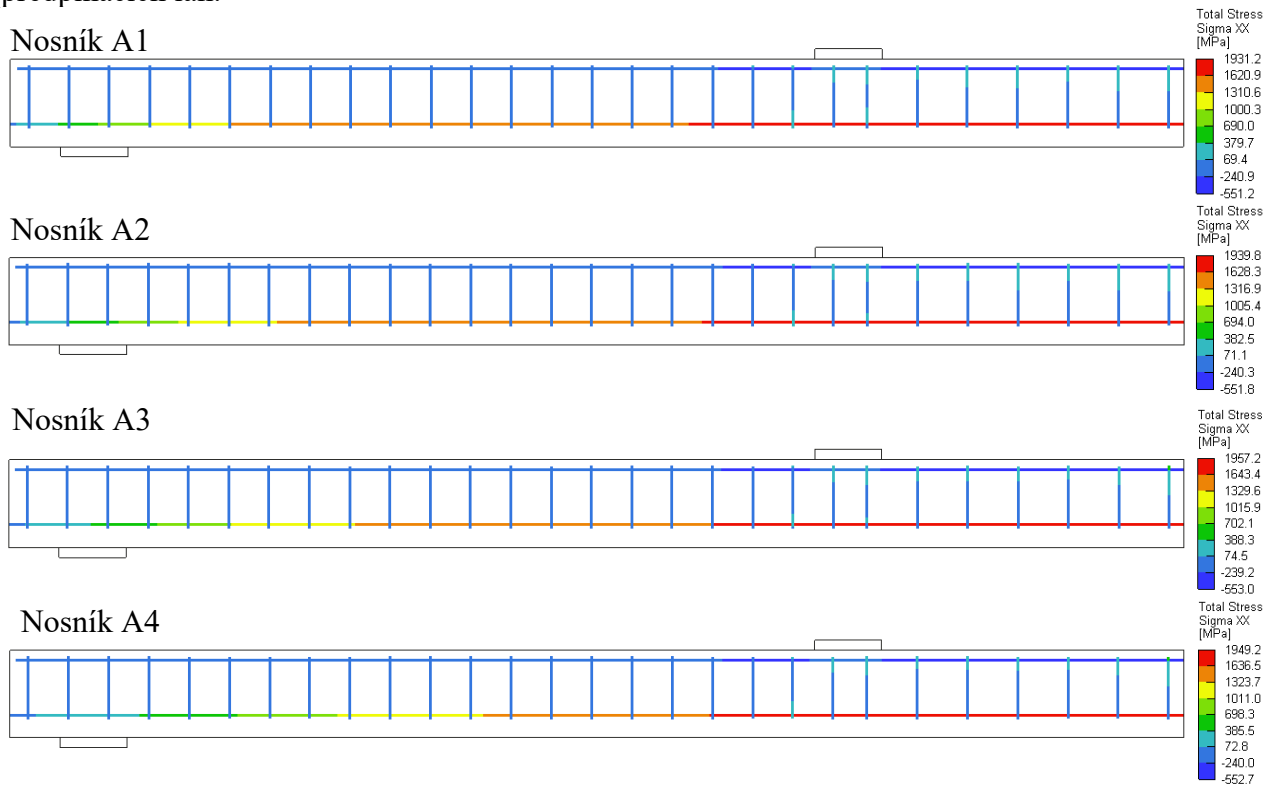
Sledovanie poklzu predpínacích lán potvrdilo, že s klesajúcou úrovňou súdržnosti sa výrazne zvyšuje relatívny poklz lana voči betónu, čo má za následok zhoršenie prenosu predpínacej sily (Obrázok 4 a Obrázok 6). Tento jav bol zreteľný najmä pri variantoch so súdržnosťou zníženou na 40 % a 20 % pôvodnej hodnoty, kde sa prenosová dĺžka predpínacej výstuže predĺžila o niekoľko desiatok percent v porovnaní s referenčným modelom.

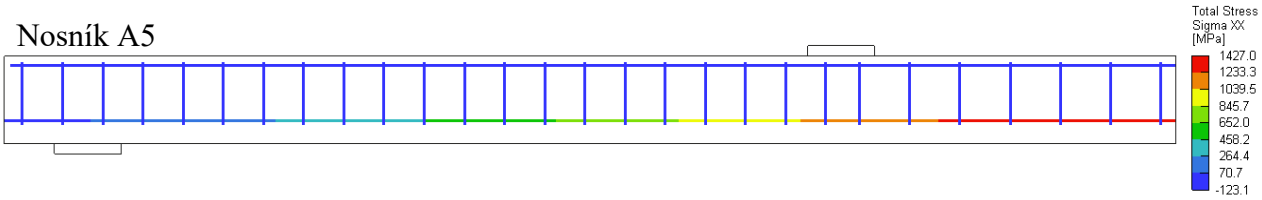




Obrázok 4: Poklz predpínacieho lana a šírka trhlín - 1860 MPa

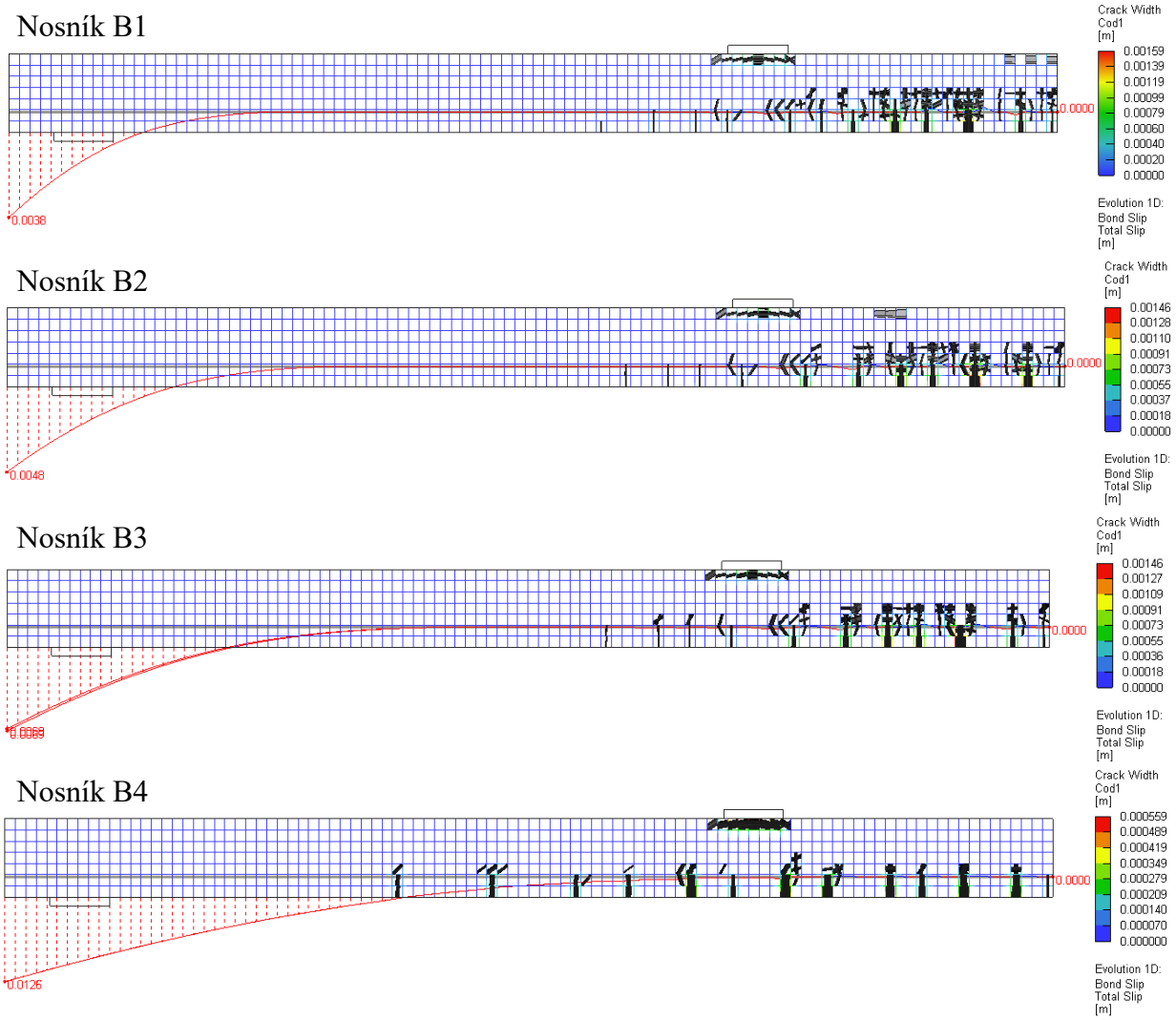
Z hľadiska napätia v predpínacej výstuži sa pri zlyhaní nosníka preukázalo, že pri nižšej súdržnosti sa v lanách vyvinulo vyššie napätie v porovnaní s plne súdržným stavom (Obrázok 5 a Obrázok 7). Výnimkou boli nosníky s najnižšou hodnotou súdržnosti (20 %), keďže v daných prípadoch došlo k zlyhaniu nosníka ešte pred tým, ako bola dosiahnutá dohovorená medza klzu predpínacích lán.

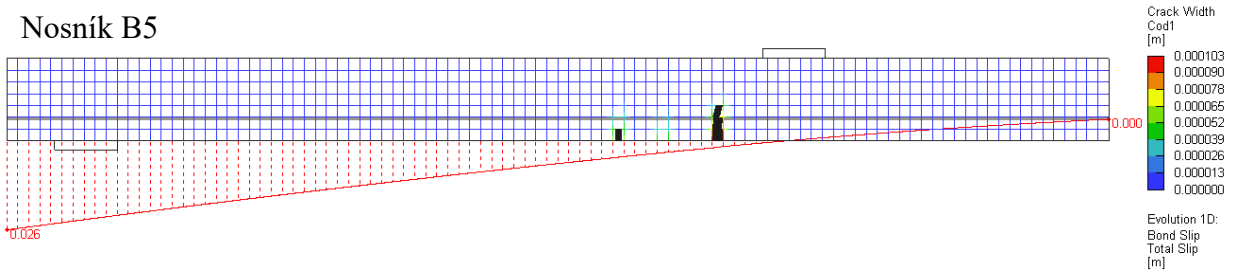




Obrázok 5: Napätie v predpínacej výstuži pred zlyhaním - 1860 MPa

V prípade nosníkov s predpínacími lanami s pevnosťou v ťahu 2460 MPa sa pozorovali výraznejšie zmeny v rozložení trhlín v porovnaní s nosníkmi s lanami s nižšou pevnosťou. Výsledkom bola väčšia vzdialenosť medzi jednotlivými trhlinami. Tento efekt bol najvýraznejší pri modeloch so zníženou úrovňou súdržnosti. Pozorovaný trend naznačuje, že pri vysokopevnostných lanách sa straty súdržnosti prejavia zreteľnejšie na rozvoji trhlín než pri bežných predpínacích výstužiach. Väčšia vzdialenosť medzi trhlinami v kombinácii s vyššou pevnosťou lana spôsobuje, že vzniknuté trhliny dosahujú väčšiu šírku, čo môže mať negatívny vplyv na dlhodobú trvanlivosť konštrukcie a prenos napätí v okolí trhlín. Tento jav je dôležitý najmä pri posudzovaní starších mostných konštrukcií s použitím vysokopevnostných predpínacích drôtov, kde sa degradácia súdržnosti vplyvom korózie môže prejaviť výraznejším zhoršením rozvoja trhlín.



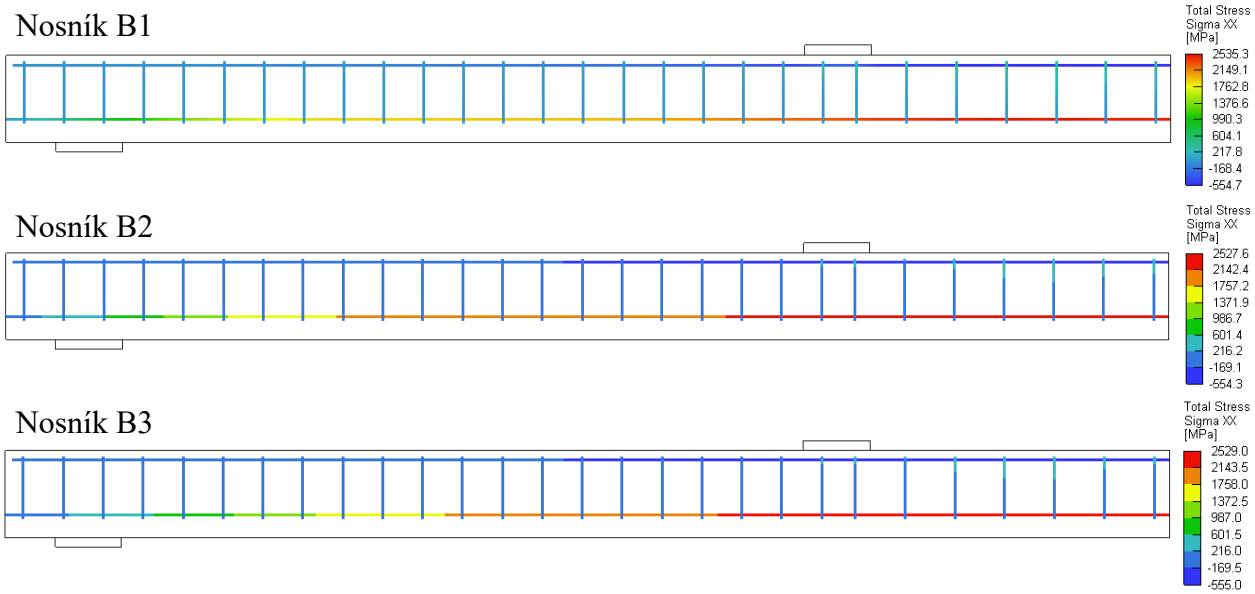


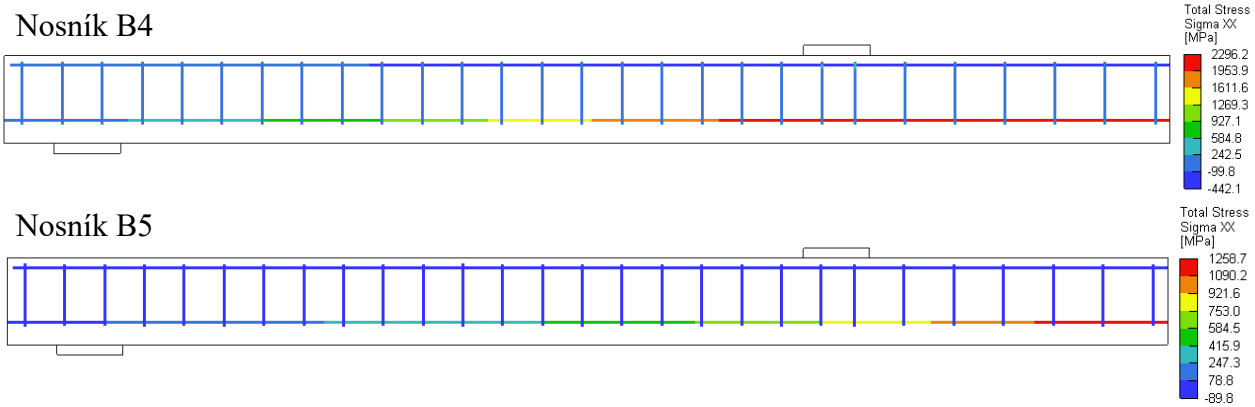
Obrázok 6: Poklz predpínacieho lana a šírka trhlín - 2460 MPa

Z analýzy napätí v predpínacej výstuži vyplynulo, že zníženie súdržnosti má významný vplyv nielen na prenos predpínacej sily, ale aj na samotný mechanizmus zlyhania nosníka. Pri vysokých úrovniach súdržnosti (100 % a 80 %) dochádzalo k postupnému rozvoju deformácií v oblasti najvyšších napätí, pričom výstuž sa pred zlyhaním dostala do oblasti plastických pretvorení. V týchto prípadoch bolo zlyhanie nosníka duktilného charakteru – s postupným šírením trhlín a viditeľným nárastom deformácií pred stratou únosnosti.

Naopak, pri nosníkoch so zníženou súdržnosťou na 40 % a 20 % sa pozoroval odlišný mechanizmus. Napätie vo výstuži pred zlyhaním nedosiahlo úroveň dohovorenej medze klzu čo znamená, že nedošlo k plastizácii predpínacích lán. Zlyhanie bolo krehké, sprevádzané náhlym nárastom šírky trhlín a prudkým poklesom únosnosti bez predchádzajúceho výrazného varovania v podobe veľkých deformácií. Tento jav súvisí s oslabeným prenosom síl medzi lanom a betónom – pri strate súdržnosti sa znižuje schopnosť výstuže redistribuovať napätia, čím sa eliminuje možnosť postupného prechodu na plastické pôsobenie.

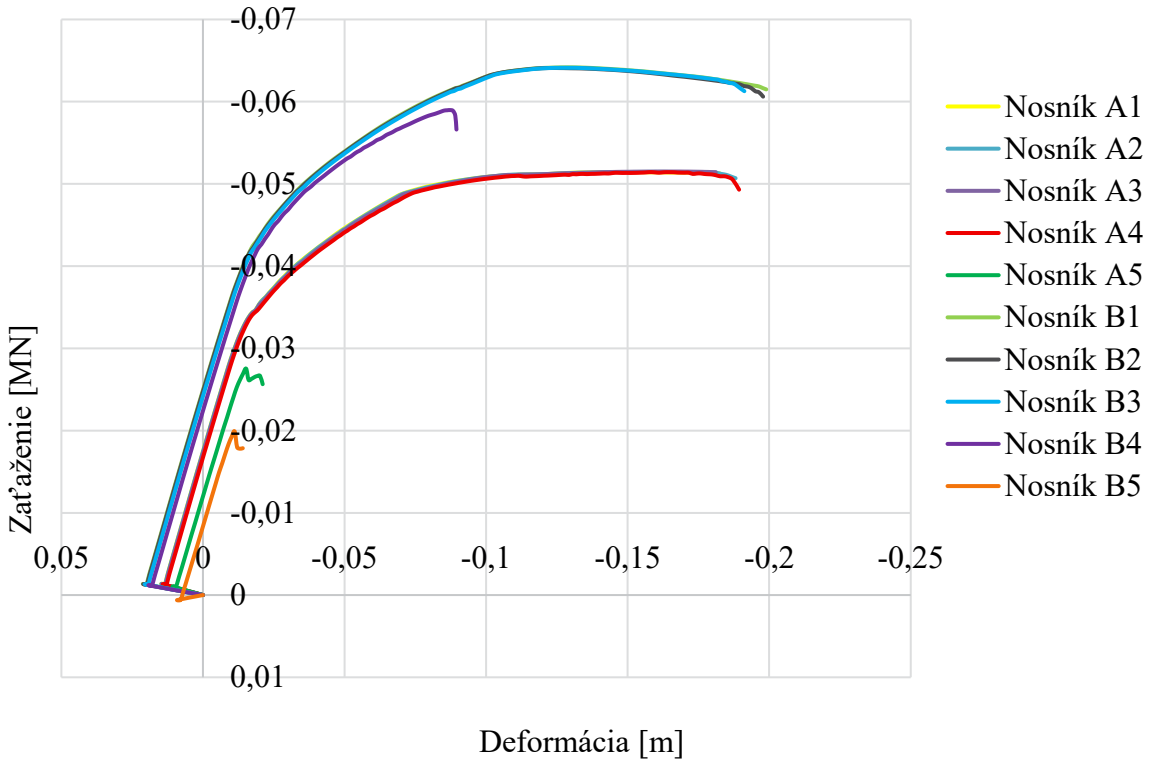
Krehké zlyhanie pri nižších úrovniach súdržnosti predstavuje potenciálne riziko aj v reálnych konštrukciách, pretože vedie k strate rezerv únosnosti a k náhlemu porušeniu bez predchádzajúcich varovných prejavov. Tento výsledok poukazuje na dôležitosť zachovania dostatočnej súdržnosti medzi predpínacou výstužou a betónom, najmä pri hodnotení existujúcich prvkov s degradovanou injektážou alebo koróziou predpínacích lán.





Obrázok 7: Napätie v predpínacej výstuži pred zlyhaním - 2460 MPa

Porovnanie dvoch skupín nosníkov ukázalo, že vyššia pevnosť predpínacej výstuže (2460 MPa) viedla k mierne väčším šírkam trhlín a väčšiemu poklzu lana (Obrázok 8). Celkovo možno konštatovať, že aj pri relatívne malom znížení súdržnosti má tento parameter výrazný vplyv na pôsobenie predpätých prvkov z hľadiska rozvoja a šírky trhlín, účinnosti prenosu predpätia a rozloženia napätí vo výstuži.



Obrázok 8: Graf vyjadrujúci závislosť zaťaženie – deformácia

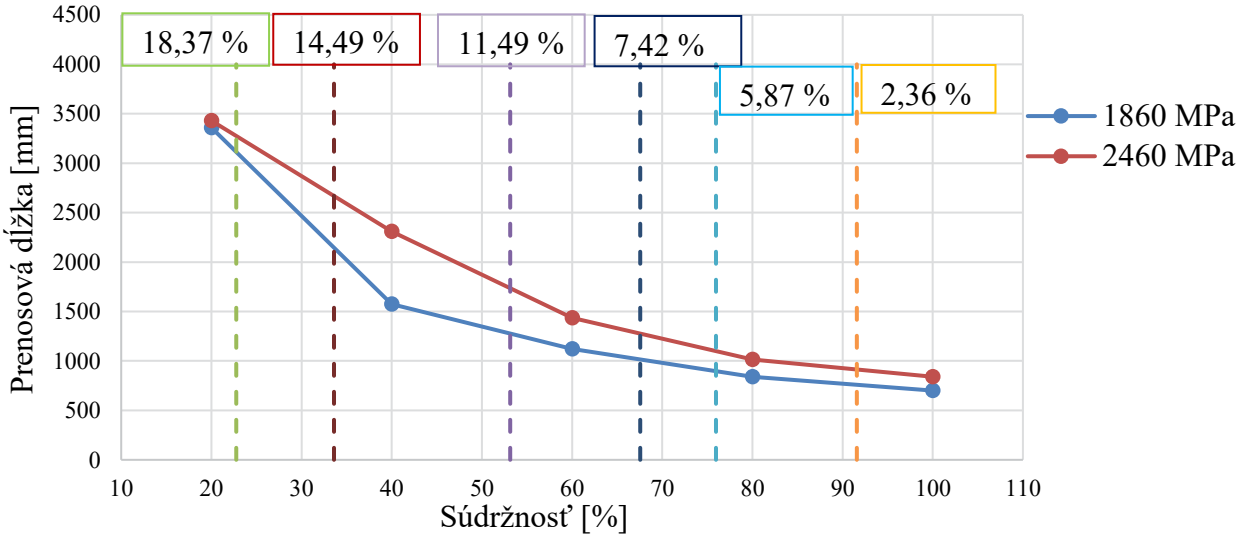
5. Záver

V práci bola vykonaná nelineárna analýza predpätých betónových nosníkov s cieľom posúdiť vplyv úrovne súdržnosti medzi predpínacou výstužou a betónom na ich celkové pôsobenie. Súdržnosť bola v modeli postupne znižovaná úpravou maximálnej hodnoty napätia v súdržnosti, pričom sa

sledoval vývoj trhlín, ich šírka a vzdialenosť, poklz predpínacej výstuže, napätie v lanách a charakter zlyhania.

Výsledky ukázali, že so znižujúcou sa úrovňou súdržnosti sa zreteľne mení rozvoj trhlín. Pri nižšej súdržnosti dochádza k skoršiemu vzniku trhlín, k zväčšeniu ich šírky a pri vysokopevnostných lanách (2460 MPa) aj k zväčšeniu vzdialenosti medzi trhlinami. Zníženie súdržnosti neovplyvnilo významne deformáciu ani únosnosť nosníkov až do približne 60 % pôvodnej hodnoty, avšak pri úrovniach 40 % a 20 % sa zmenil charakter zlyhania z duktilného na krehký. V týchto prípadoch nedošlo k plastizácii výstuže, čo potvrdzuje oslabený prenos napätí a obmedzenú schopnosť redistribúcie síl medzi výstužou a betónom.

Získané poznatky zdôrazňujú, že zachovanie dostatočnej súdržnosti medzi predpínacou výstužou a betónom je rozhodujúce nielen pre efektívny prenos predpínacej sily, ale aj pre zabezpečenie duktilného pôsobenie a trvanlivosti konštrukcie. Výsledky sú zároveň relevantné pre hodnotenie existujúcich predpätých konštrukcií, pri ktorých môže degradácia injektáže alebo korózia predpínacích lán viesť k výraznému zníženiu súdržnosti, väčším trhlinám a krehkému spôsobu porušenia. Pre možné reprezentovanie vplyvu korózie na súdržnosť bol vypracovaný graf závislosti prenosovej dĺžky a súdržnosti (Obrázok 9).



Obrázok 9: Prenosová dĺžka – Súdržnosť

Graf zobrazuje závislosť prenosovej dĺžky od percentuálnej straty súdržnosti predpínacej výstuže, pričom dve hlavné krivky reprezentujú rôzne typy výstuže. Zvislé čiary označujú konkrétne stupne korózie vyjadrené percentuálnou stratou hmotnosti predpínacieho lana, ktoré boli prebrané z publikácie [3]. Následne boli na týchto lanách vykonané pull-out testy, ktorými sa zistila súdržnosť lán s betónom. Tieto referenčné hodnoty umožňujú vizuálne porovnať dopad rôznych úrovní korózie na prenosovú dĺžku. Z grafu je zrejmé, že s rastúcou stratou súdržnosti dochádza k výraznému predĺženiu prenosovej dĺžky. V počiatočných fázach korózie je nárast prenosovej dĺžky miernejší, zatiaľ čo pri vyšších úrovniach korózie je nárast výraznejší, čo naznačuje nelineárny charakter vplyvu korózie na mechanické vlastnosti systému. Takýto graf efektívne ilustruje citlivosť prenosovej dĺžky na degradáciu predpínacej výstuže a poskytuje vizuálny nástroj na kvantifikáciu dopadu korózie pre rôzne scenáre.

Literatúra

[1] EN 1992-1-1:2023: *Eurocode 2 – Design of concrete structures- Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures*.

[2] BILČÍK, I. a kol.: *Betónové konštrukcie.* Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2008. 374 s. ISBN: 978-80-227-2940-6.

[3] LI, H. - YANG, Y. - LI, C. - WANG, X. a TANG, H.: A new analytical model for bond strength between corroded steel strand and concrete. [online]. *Scientific Reports*. 2024, roč. 14, č. 2235. Dostupné na: https://doi.org/10.1038/s41598-024-62763-z

Hussein KAMAL[1*a]

Theory and Structures of Civil Engineering Works 2024/2025

STRUT-AND-TIE MODEL ANALYSIS OF DEEP BEAMS INCORPORATING RECYCLED CONCRETE AGGREGATE

Abstract.

In this study, deep reinforced concrete beams with dimensions of 1100 × 400 × 150 mm were analyzed using the Strut-and-Tie Model (STM) to evaluate the influence of recycled concrete aggregate (RCA) on structural behavior. Multiple experimental datasets from different studies were considered to ensure a comprehensive evaluation of RCA performance. The coarse and fine aggregate replacement ratios ranged from 0% to 100%, and the effective compressive strength of the struts was adjusted according to each mixture's mechanical properties. The analysis revealed a consistent trend of decreasing ultimate load capacity with increasing RCA content, regardless of the source study or replacement type. However, minor variations were observed depending on the fine to coarse replacement ratio. The findings confirm that STM provides a reliable framework for predicting the load-carrying capacity of deep beams incorporating varying proportions of recycled aggregates.

Key words:

Strut-and-Tie Model (STM); Deep beam; Recycled concrete aggregate (RCA); Ultimate load capacity; Structural concrete; Sustainable construction; ACI 318.

1. Introduction

Reinforced concrete deep beams (DB) play a vital role in modern structural engineering due to their remarkable ability to sustain heavy loads. These elements, typically composed of concrete and embedded steel reinforcement, are frequently employed in critical applications such as transfer girders, foundation walls, pile caps, offshore platforms, water tanks, and high-rise buildings, where reliable performance under significant shear forces is essential. A defining feature of deep beams is their relatively small span-to-depth ratio (often less than 4:1), which sets them apart from conventional slender beams. Figure 1. The study of deep beams dates back to the late 19th century, when early civil engineering researchers such as J. L. Meek [1] and J. O. Soboya [2] first highlighted their importance in bridge construction and other load-bearing systems. Since then, substantial efforts have been dedicated to examining their structural response under varying conditions, including static and dynamic loads and different reinforcement layouts. Research findings consistently show that while deep beams possess superior shear and flexural resistance, they are also prone to complex modes of failure, commonly diagonal tension cracking, shear sliding, or compression strut failure. Designing reinforcement systems that can effectively mitigate these vulnerabilities remains a key challenge. Approaches ranging from conventional shear reinforcement to inclined struts and prestressing techniques have been tested, each offering distinct strengths and practical constraints.

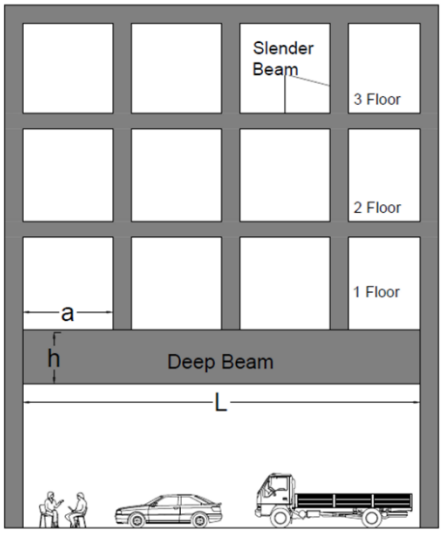


Figure 1: Deep beam and slender beam [3]

In recent years, the use of recycled concrete aggregate (RCA) has attracted significant attention as part of global efforts to promote sustainable construction and reduce the environmental footprint of the building industry. RCA is typically produced by crushing demolished concrete elements and reusing them as a partial or full replacement for natural aggregates. While numerous investigations have explored the mechanical properties of recycled aggregate concrete (RAC) in conventional structural elements such as beams, columns, and slabs, very limited research has been devoted to its application in reinforced concrete deep beams (DB). This scarcity of studies is noteworthy given the critical role of deep beams in carrying high shear forces and transferring large, concentrated loads in essential structural systems.

The incorporation of RCA in deep beams presents both opportunities and challenges. On one hand, the reuse of demolition waste can significantly reduce the demand for natural aggregates, thereby conserving natural resources, lowering construction costs, and minimizing landfill disposal. On the other hand, recycled aggregates generally exhibit higher porosity, weaker bonding properties, and greater variability compared to natural aggregates, which can lead to reductions in compressive strength, stiffness, and durability of the resulting concrete. These characteristics are particularly concerning for deep beams, where shear capacity and strut integrity are decisive for structural safety. Previous studies on RAC beams and columns have reported reductions in load-carrying capacity and stiffness proportional to the percentage of RCA used, along with increased cracking and deformation under service loads [4, 5, 6, 7, and 8]. However, because deep beams are governed by discontinuity regions (D-regions) and complex stress transfer mechanisms, their behavior with RCA may not directly follow the patterns observed in slender elements. For instance, the strut-and-tie action that dominates deep beam performance could be significantly influenced by changes in aggregate strength and stiffness, potentially leading to premature diagonal cracking or reduced strut efficiency. Despite these concerns, the potential application of RCA in deep beams remains highly promising. The unique load-transfer mechanisms of deep beams may allow them to accommodate the relatively lower mechanical properties of RAC without compromising overall structural safety, provided that appropriate reinforcement strategies are employed. Furthermore, the lack of experimental and numerical investigations on this topic highlights a significant gap in the literature that warrants further study. Analytical modelling using the Strut-and-Tie Model (STM) provides an effective means of evaluating the structural performance of deep beams incorporating recycled concrete aggregate (RCA) and comparing their behavior with conventional natural aggregate concrete. This approach

not only enhances the understanding of sustainable materials in structural applications but also offers practical guidance for the safe and reliable use of recycled aggregates in critical load-bearing elements.

In conventional thin beam theory, the Bernoulli–Navier assumption states that strains vary linearly across the section depth relative to the neutral axis, implying that shear effects are negligible and flexural behavior dominates. This simplification, however, becomes invalid when dealing with deep beams, where the structural response is strongly influenced by shear actions and geometric discontinuities. Such zones, referred to as D-regions (disturbed or discontinuity regions), display highly nonlinear strain distributions due to abrupt changes in geometry, load paths, or boundary conditions. The Strut-and-Tie Model (STM) is particularly suited for analyzing these regions, providing a rational framework for capturing their complex behavior.

D-regions play a crucial role in the design of deep beams, as they are the areas within a column that experience variations in concrete compression, resulting in changes in stresses and strains. Deep beams, characterized by their greater depth relative to their spans, pose design challenges due to internal stress concentrations. STM is based on a truss modeling approach, where compression struts and tension ties represent the internal forces acting on the structure (Figure 1). In this methodology, the beam is divided into segments and modeled as a series of trusses, with ties symbolizing tensile stresses and struts indicating compressive stresses. Figure 2

There are studies discussing the behavior of these areas and analysis methods that resemble STM principles. The STM-designed deep beams have received high praise from engineers and architects for their quality and performance. In conclusion, STM is an effective technique for designing concrete deep beams, demonstrating its applicability in various structures. For STM to be effective, it must be meticulously planned and executed.

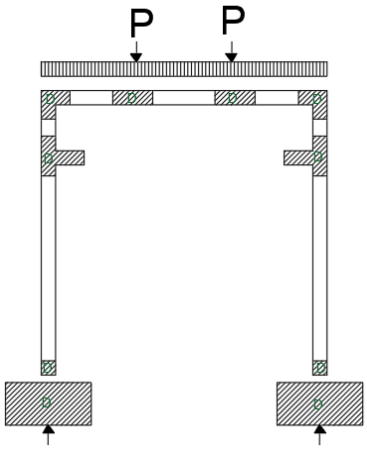


Figure 2: Frame structure containing both B- and D-regions, Frame structure [9]

2. Experimental program

The experimental program of this study involved a comprehensive assessment of multiple concrete mixtures incorporating recycled concrete aggregates (RCA) with varying replacement levels. Five sets of data from different experimental investigations were analyzed to cover a wide range of course and fine aggregate replacement ratios, from 0% up to 100%. All beam specimens were designed as simply supported deep beams subjected to two-point loading applied at the top

surface. The Strut-and-Tie Model (STM) approach was employed to interpret and predict the structural response, following the provisions of ACI 318[10], the fib Model Code[11], and the design recommendations of Schlaich et al. (1987)[12].Each beam specimen had overall dimensions of 1100 mm × 150 mm × 400 mm (length × width × height) with a clear span of 900 mm, corresponding to a constant shear span-to-depth ratio (a/d) of 0.8. A concrete cover of 25 mm was provided for the stirrups. To ensure adequate strut stability and prevent premature crushing, longitudinal compression reinforcement was arranged parallel to the main strut axis, while continuous closed ties were distributed along the strut to resist the induced diagonal tensile forces. The representative STM configuration used in the analysis is illustrated in Figure 3.

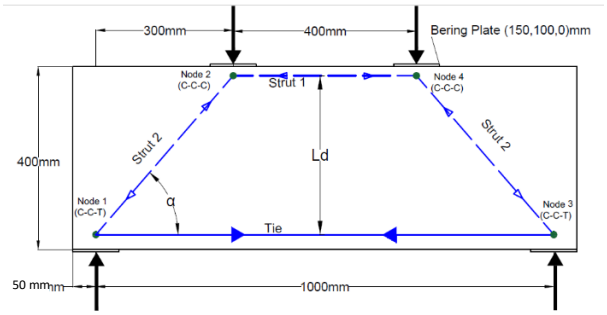


Figure 3: Strut and Tie model of the deep beam

The geometry of DP and reinforcement is shown in Figure 4. The reinforcement of the specimen was designed with conventional reinforcement. The reinforcement of DB consists of the main longitudinal reinforcement (4Ø16), vertical reinforcement (6Ø10) placed longitudinally to improve shear resistance and contribute to the overall integrity of the beam, and shear reinforcement (stirrups Ø10@100 mm) along the length of the beam to prevent shear failure and ensure stability under loading, as shown in Figure 4.

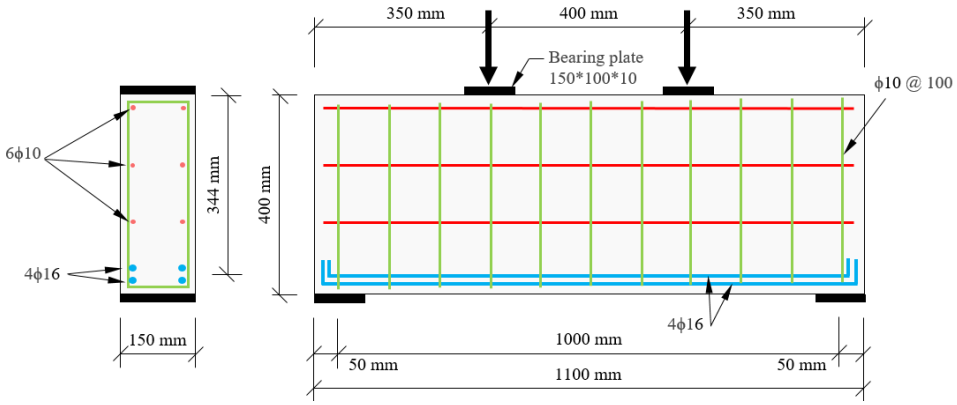


Figure 4: the reinforcement in the deep beam

Table 1: Concrete cube compressive strength at 28 days

Reference	ID	Concrete RC percentage%		28 days (MPa)
		Coarse	Fine	
Adrián [13]	ARC0	0	0	45.36
	ARC25	25	0	21.39
	ARC50	50	0	29.91
	ARC75	75	0	20.24
Folino [14]	FRC0	0	0	36.52
	FRC28	28	0	33.59
	FRC57	57	0	30.42
	FRC100	100	0	29.10
Medina [15]	MRC0	0	0	53.70
	MRC25	25	0	45.61
	MRC25	50	0	43.80
S. Manzi [16]	SRC0F0	0	0	41.30
	SRC38F0	38	0	51.40
	SRC20F30	20	30	45.63
	SRC0F50	0	50	44.74
M. Etxeberria [17]	ERC0F0	0	0	42.05
	ERC21F10	21	10	42.24
	ERC42F20	42	20	41.02
	ERC75F40	75	40	40.33

3. The calculation

Complex physical systems, such as deep beams, can be rationally assessed through the Strut-and-Tie Model (STM), which provides a simplified, yet reliable analytical approach rooted in equilibrium and compatibility principles. In this study, the deep beams were analyzed according to the ACI 318 Appendix A provisions, supported by the fib Model Code and the recommendations of Schlaich et al. (1987) figure 5-a,b, check table 2

$$T = f_y * A_s = 0.85 * f_{ć} * b * W_{c1} \quad (1)$$

Where:
T = tensile force in the tie
$\boldsymbol{F_y}$= yield strength of reinforcement
$\boldsymbol{A_s}$= = area of reinforcement
$\boldsymbol{f_{ć}}$ = compressive strength of concrete
b = width of the section
$\boldsymbol{W_{c1}}$= effective width of the strut

$$L_d = d - \frac{W_{c1}}{2} \quad (2)$$

$$tan(\alpha) = \frac{L_d}{a} \quad (3)$$

Table 2: The Ld and angle for each different mix designee

ID	Wc1 (mm)	d (mm)	a (mm)	Ld (mm)	α
ARC0	65,78	344	300	311,11	46,04
ARC25	73,69	344	300	307,16	45,68
ARC50	72,59	344	300	307,70	45,73
ARC75	73,61	344	300	307,20	45,68
FRC0	74,74	344	300	306,63	45,63
FRC28	81,26	344	300	303,37	45,32
FRC57	89,72	344	300	299,14	44,92
FRC100	93,79	344	300	297,10	44,72
MRC0	50,83	344	300	318,59	46,72
MRC25	59,84	344	300	314,08	46,31
MRC25	62,31	344	300	312,84	46,20
SRC0F0	66,09	344	300	310,96	46,03
SRC38F0	53,10	344	300	317,45	46,62
SRC20F30	59,86	344	300	314,07	46,31
SRC0F50	61,06	344	300	313,47	46,26
ERC0F0	64,99	344	300	311,51	46,08
ERC21F10	64,99	344	300	311,51	46,08
ERC42F20	66,57	344	300	310,71	46,01
ERC75F40	68,23	344	300	309,88	45,93

Each beam was idealized as a truss system in which the compressive struts and tensile ties were explicitly defined, and their dimensions were calculated based on geometry and equilibrium conditions. The effective strength of the struts was reduced in accordance with ACI guidelines to account for concrete cracking and nonlinear stress distribution. Reinforcement was represented as tensile ties, ensuring that steel capacity was properly considered in the load transfer mechanism.

Table 3 presents at the calculated ultimate loads from the analytical STM procedure of deep beams with conventional and strut-based reinforcement. Check figure 6 and 7

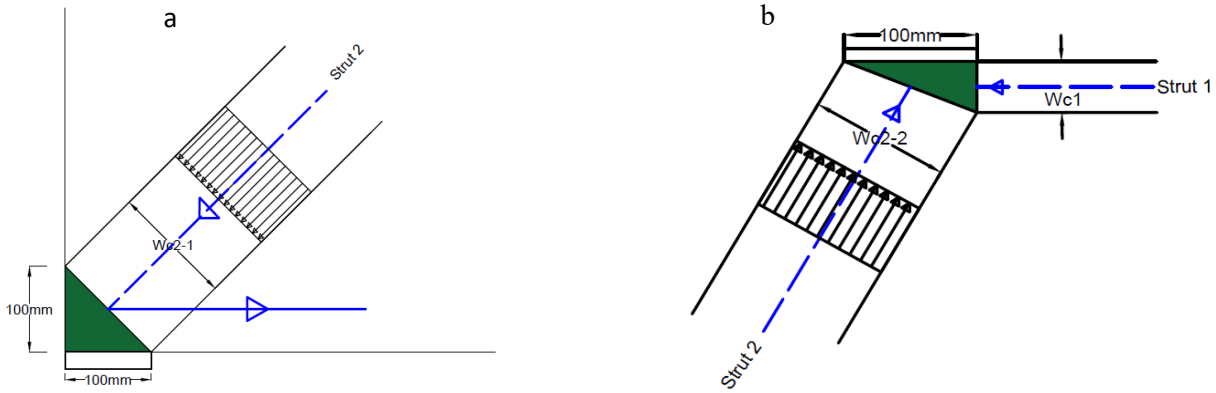


Figure 5: a) Node 2 & 4, b) Node 1 & 3

Table 3: The result of the calculation

ID	Strut 1 capacity (kN)	Strut 2 capacity (kN)	Total maximum load (kN)
ARC0	348,0	248,9	348,0
ARC25	348,0	232,4	332,5
ARC50	348,0	234,5	335,8
ARC75	348,0	232,6	332,7
FRC0	348,0	230,5	329,5
FRC28	348,0	219,7	312,4
FRC57	348,0	208,1	293,9
FRC100	348,0	203,3	286,2
MRC0	348,0	294,8	348,0
MRC25	348,0	264,4	348,0
MRC25	348,0	257,6	348,0
SRC0F0	348,0	248,2	348,0
SRC38F0	348,0	286,1	348,0
SRC20F30	348,0	264,3	348,0
SRC0F50	348,0	260,9	348,0
ERC0F0	348,0	250,8	348,0
ERC21F10	348,0	250,8	348,0
ERC42F20	348,0	247,1	348,0
ERC75F40	348,0	243,4	348,0

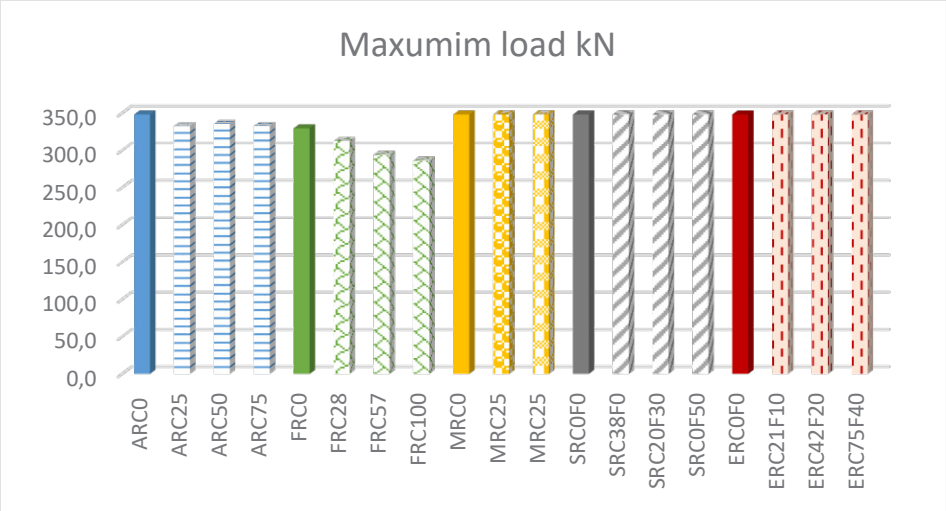


Figure 6: maximum load kN

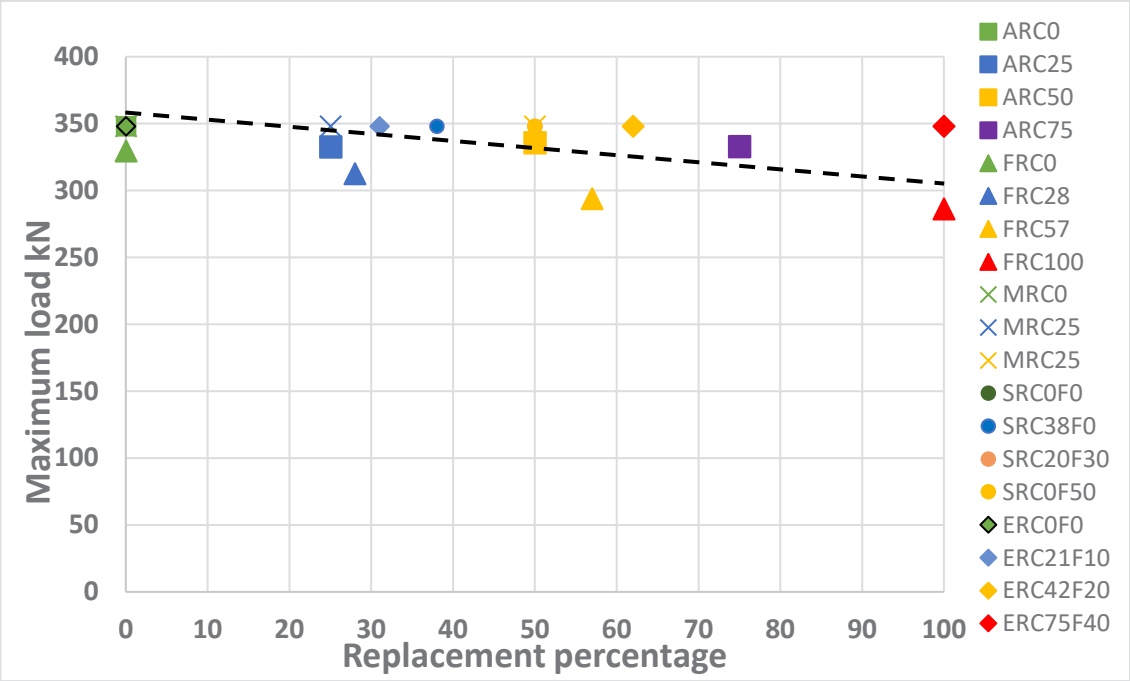


Figure 7: maximum load kN and the replacement percentage for each group

4. Conclusion

The analytical results derived from the five experimental datasets clearly illustrate the consistent influence of recycled concrete aggregate (RCA) replacement on the load-carrying behavior of deep beams analyzed using the Strut-and-Tie Model (STM). For all beams, the capacity of Strut 1 remained constant at approximately 348 kN, as it was mainly governed by the beam geometry and reinforcement layout. However, Strut 2 exhibited a noticeable decrease with increasing RCA content across all study groups, dropping from about 249–295 kN in control specimens to roughly 232–243 kN in the highest RCA mixtures.

Correspondingly, the total maximum load followed a declining trend. The reference beams with natural aggregates recorded the highest strengths, ranging from about 357 to 429 kN, while beams incorporating RCA showed reductions of approximately 7% to 15%, depending on the replacement ratio and aggregate type. Slight irregularities were observed in some cases, such as the 50% replacement mixes, which occasionally achieved higher loads than 25% or 75%, indicating the influence of aggregate variability and the interfacial transition zone quality.

Overall, the comparative analysis of the five datasets confirms that higher RCA content leads to a measurable reduction in both strut efficiency and total beam strength. Nevertheless, STM proved to be a reliable and conservative analytical tool, successfully capturing the performance trends across all groups. These results support the feasibility of using RCA in structural deep beams when appropriate reduction factors and design considerations are implemented to maintain safety and serviceability.

Acknowledgments

This research was supported by the projects APVV-23-0193, APVV-23-0383, and the Young Researchers Support Program of SUT: The effect of recycled concrete aggregate on the resistance of deep beams.

Reference

[1] Meek, J. L. (1965). "Behavior of Deep Beams." Journal of the American Concrete Institute, 62(4), 469-488.

[2] Soboya, J. O. (1993). "Analysis and design of deep beams." Journal of Structural Engineering, 119(2), 529-545.

[3] C. D. D. B. O. Williams, "Strut-and-Tie Model Design Examples for Bridges: Final Report." 2012.

[4] H. K. Kadhim and M. D. Abdullah, "Concrete Deep Beam with Strut Reinforcement," Muthanna Journal of Engineering and Technology, vol. 4, no. 8, pp. 12–23, Jan. 2023. https://www.researchgate.net/publication/384251181

[5] N. Kachouh, T. El Maaddawy, H. El Hassan, and B. El Ariss, "Shear response of recycled aggregates concrete deep beams containing steel fibers and web openings," Sustainability, vol. 14, no. 2, Art. 945, 2022. https://doi.org/10.3390/su14020945

[6] A. H. Wanas, J. J. Fahad, and H. A. Mushatat, "Evaluation of shear behavior of prepared recycled concrete aggregate concrete deep beam," Period. Eng. Nat. Sci., vol. 11, no. 2, pp. 297–306, Apr. 2023. https://pdfs.semanticscholar.org/4329/2f33f2d224e1dd2920451b4eb7f120b3db50.pdf

[7] A. El Kholy, S. Elkholy, and A. Godat, "Towards finite element modelling of reinforced recycled coarse aggregate concrete deep beams," in Proc. 2022 Advances in Science and Engineering Technology Int. Conf. (ASET), 2022, pp. –, doi:10.1109/ASET53988.2022.9734846. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9734846

[8] N. Kachouh, T. El-Maaddawy, H. El-Hassan, and B. El-Ariss, "Shear behavior of steel-fiber-reinforced recycled aggregate concrete deep beams," Buildings, vol. 11, no. 9, p. 423, 2021, doi: 10.3390/buildings11090423. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2075-5309/11/9/423

[9] A. Quesada, "FHWA: Deep Beam Design," Capstone Project, Department of Civil Engineering, Northern Arizona University, Flagstaff, AZ, USA, 2014. [Online]. Available: https://sce.nau.edu/capstone/projects/CENE/2014/EisenhowerProject/Final%20Report.pdf . [Accessed: 30-Sep-2025]

[10] American Concrete Institute, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*, Farmington Hills, MI, USA: ACI, 2019. https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/318-19_preview.pdf?utm_source=chatgpt.com

[11] fib – Fédération Internationale du Béton, *fib Model Code for Concrete Structures 2010*, Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 2013. https://shop.fib-international.org/publications/free-documents/146-model-code-2010-first-complete-draft-volume-1-pdf?utm_source=chatgpt.com

[12]J. Schlaich, K. Schäfer, and M. Jennewein, "Toward a consistent design of structural concrete," *PCI Journal*, vol. 32, no. 3, pp. 74–150, May–Jun. 1987. https://www.pci.org/PCI_Docs/Design_Resources/Guides_and_manuals/references/bridge_design_manual/JL-87-May-June_Toward_a_Consistent_Design_of_Structural_Concrete.pdf?utm_source=chatgpt.com

[13] A. Ondák, "THE EFFECT OF AMOUNT OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE ON THE LONG-THERM PROPERTIES OF OF RECYCLED CONCRETE MEMBERS," Proceedings of AACEE 2022, Bratislava, Slovakia, pp.490,2022. https://www.svf.stuba.sk/buxus/docs/aacee/Zbornik_AACEE_2022.pdf

[14] Folino, P., Xargay, H., & González, J. (2014). Recycled aggregate concrete – Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression. Construction and Building Materials, 56, 21–31. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.073

[15] Medina, C., Zhu, W., Howind, T., Rojas, M., & Frías, M. (2014). Influence of mixed recycled aggregate on the physical and mechanical properties of recycled concrete. Journal of Cleaner Production, 68, 216–225. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.002

[16] Manzi, S., Mazzotti, C., & Lippiatt, R. (2013). Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate. Cement and Concrete Composites, 37, 312–318. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.003

[17] Etxeberria, M., Marí, A. R., & Vázquez, E. (2007). Recycled aggregate concrete as structural material. Materials and Structures, 40(5), 529–541. https://doi.org/10.1617/s11527-006-9161-5

***Michal Kázsmér*[1], *Artem Chystiakov*[2]**
Študijný program: Teória a Konštrukcie Inžinierskych Stavieb, 4.:

NÁVRH EXPERIMENTU DREVO-PLASTOVÉHO KOMPOZITNÉHO NOSNÍKA TLAČENÉHO NA 3D TLAČIARNI

DESIGN OF AN EXPERIMENT OF A WOOD–PLASTIC COMPOSITE BEAM FABRICATED BY 3D PRINTING

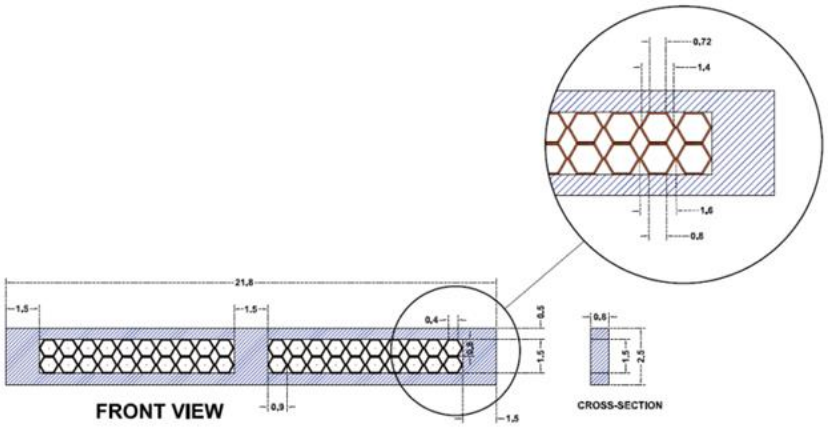
Abstract
The paper presents the design and numerical analysis of a truss beam made of a 3D-printed wood–plastic composite (WPC). The aim was to develop a numerical model serving as a basis for subsequent experimental testing. The material was characterised through tensile and bending tests according to ISO 527-4:2023 and EN 310:1993 standards, from which a stress–strain diagram was derived and implemented in the FEM model. The numerical simulation was performed in the SOFiSTiK environment using shell elements with a thickness of 4 mm and a geometrically and materially nonlinear three-point bending analysis. The mesh convergence test confirmed the stability of the solution – the difference in normal stress σ_x between the two finest meshes (2 mm and 1 mm) was 3.45 %. The maximum load-bearing capacity of the specimen was determined to be 115 N at a deformation of 0.6 mm. 3D printing of structural members made from wood–plastic composites represents a promising approach for the production of structural components with a high degree of geometric atypicality and potential for topological optimisation.

Kľúčové slová / Key Words
Drevo-plastový kompozit, 3D tlač, Priehradový nosník.

1. Úvod

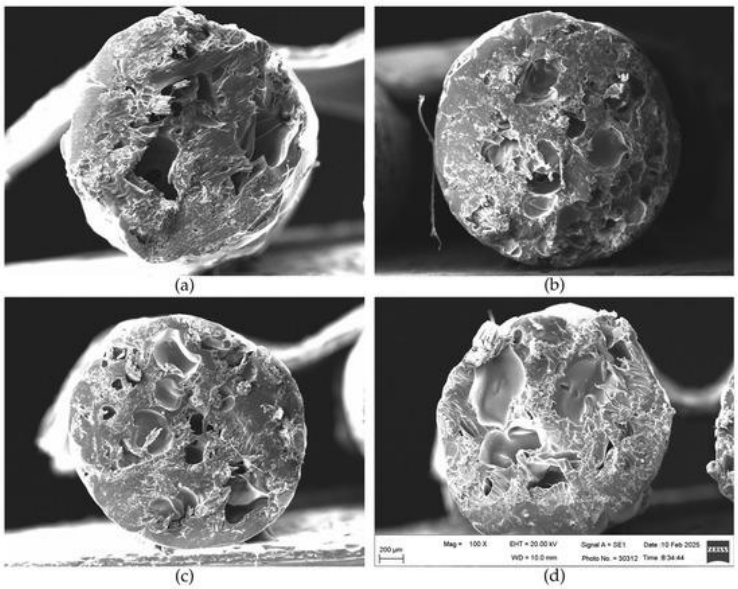
Pokrok v oblasti aditívnej výroby (Additive Manufacturing, AM), najmä metód Fused Filament Fabrication (FFF) a Fused Deposition Modelling (FDM), umožňuje nový pohľad na výrobu konštrukčných prvkov. Tieto technológie umožňujú vytvárať komplexné geometrie z digitálnych modelov, pričom poskytujú vysokú mieru slobody tvarov jednotlivých prvkov, možnosť vysokej variability typov prvkov a presné riadenie rozloženia materiálu v konštrukcii [1][2][3]. Na rozdiel od tradičných výrobných postupov, ktoré sa spoliehajú na hranaté, pravidelné prierezy, aditívna výroba umožňuje optimalizovať tvar a hmotnosť podľa rozloženia vnútorných síl, čím sa zvyšuje pomer tuhosti k hmotnosti a otvárajú sa možnosti použitia nástrojov využívajúcich typologickú optimalizáciu [4]. Vďaka tomu sa 3D tlač stáva atraktívnym nástrojom pre vývoj inovatívnych nosníkov a sendvičových systémov s vysokou účinnosťou a nízkou ekologickou stopou, Obr.1.

[1] Michal, Kázsmér, Ing. michal.kazsmer@stuba.sk Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Stavebná Fakulta.
[2] Artem, Chystiakov, Ing. artem.chystiakov@stuba.sk Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Stavebná Fakulta.



Obr. 1 Príklad skúmaných kompozitných nosníkov. [1]

Medzi rôznymi tlačiteľnými materiálmi sa v posledndom období ukázali ako perspektívne drevo-plastové kompozity (Wood–Plastic Composites, WPCs), ktoré spájajú mechanickú výkonnosť, udržateľnosť a estetiku. WPC kompozity umožňujú zúžitkovať piliny alebo iný odpad z drevospracujúceho priemyslu v kombinácii s termoplastickými polymérmi, ako sú ABS alebo PLA, čím vzniká udržateľný materiál vhodný aj pre architektonické a konštrukčné aplikácie [5]. Pomery medzi drevom a plastom, ako aj veľkosť a tvar drevných častíc, výrazne ovplyvňujú pevnosť, tuhosť a tlačiteľnosť výsledného kompozitu, Obr. 2. Správne pripravené filamenty s homogénnou štruktúrou zabezpečujú lepšie väzby medzi fázami a menšie tepelné poškodenie drevných častíc, čo vedie k vyššej kvalite výtlačkov. [2][6][7].



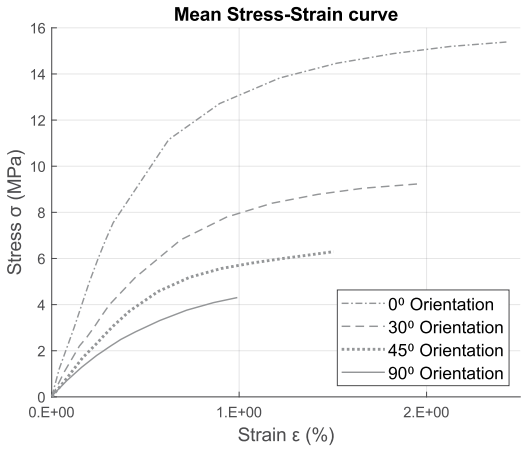
Obr. 2 Prierezy vlákien rôznych skúšobných vzoriek. [7]

Napriek týmto pokrokom zostáva výskum 3D tlačených nosníkov na báze drevo-plastových kompozitov stále v počiatočnom štádiu. Väčšina existujúcich štúdií sa zameriava na materiálové charakteristiky alebo malé skúšobné vzorky, nie na reálne ohýbané prvky. Cieľom tohto výskumu je zahájiť skúmanie konštrukčných prvkov najskôr na zmenšených modeloch, ktoré sa neskôr pretavia do vzoriek prvkov skutočných rozmerov.

2. Návrh experimentu

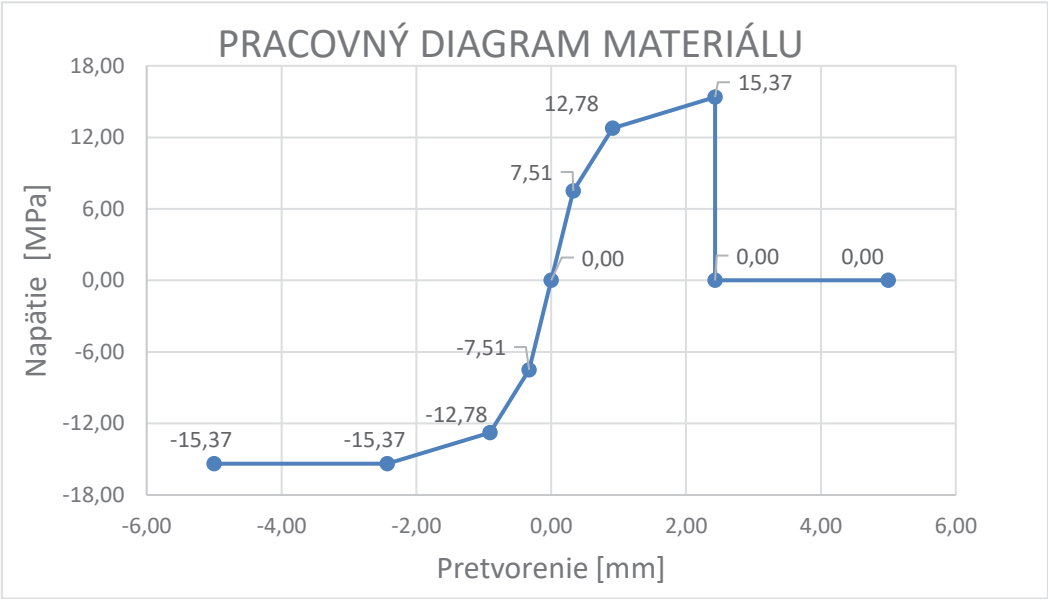
2.1 Materiál

Ako materiál je použitý drevo-plastový kompozit na ktorom boli vyhotovené materiálové skúšky, v súlade s ISO 527-4:2023 [8] a EN 310:1993 [9]. Z týchto skúšok boli vyhotovené pracovné diagramy v rôznych smeroch namáhania vzhľadom na orientáciu vlákien Obr. 3.



Obr. 3 Pracovný diagram zo skúšok podľa ISO 527-4:2023. [8]

Na základe pracovných diagramov z experimentov bol zhotovený materiálový model pre účely FEM modelu Obr. 4.



Obr. 4 Pracovný diagram pre FEM model.

2.2 Skúšobná vzorka

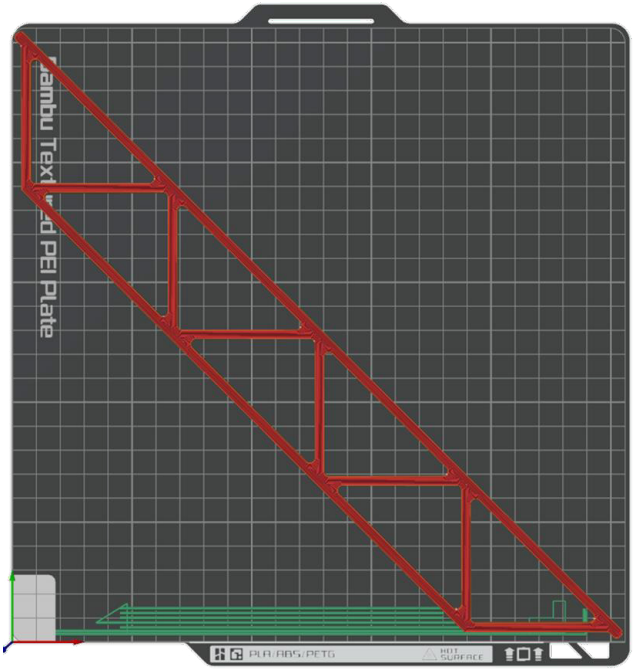
Vzorka bola navrhnutá v súlade výrobnými limitmi súčasnej tlačiarne a pre potreby skúšky v trojbodovom ohybe. Tvar skúšaného nosníka bol zvolený priehradový. Priestor tlače je 256 mm x 256 mm x 256 mm.

Pre maximalizovanie rozmerov skúšobnej vzorky bola zvolená diagonálna orientácia na tlačovej podložke, Obr. 5. Výška nosníka bola stanovená ako 1/8 zo vzdialenosti podpier skúšobnej zostavy, ostatné rozmery sú popísané v Tabuľke 1.

Tabuľka 1 Geometria skúšobnej vzorky

Popis	***označenie***	***hodnota***	***jednotka***
Dĺžka nosníka	L =	348,8	mm
Výška nosníka	H =	47,1	mm
Vzdialenosť uzlov priehradovky	a =	43,1	mm
Výška prierezu prútov	h =	4,0	mm
Šírka prierezu prútov	b =	4,0	mm
Priemer zaoblenia hrán	r =	4,0	mm

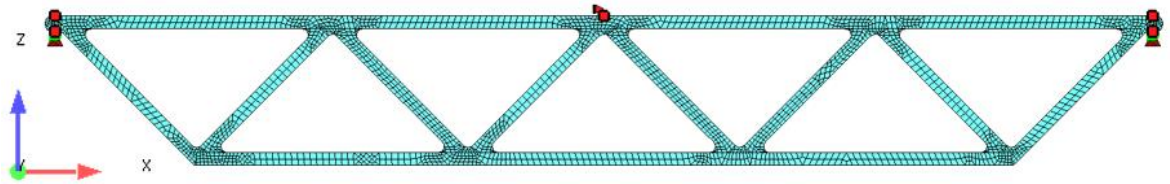
Horný a spodný povrch je uvažovaný koncentrický. Hustota výplne je 100% a vzor výplne je koncentrický. Celková hmotnosť vzorky je 21,47 g.



Obr. 5 Umiestnenie vzorky na tlačovej podložke.

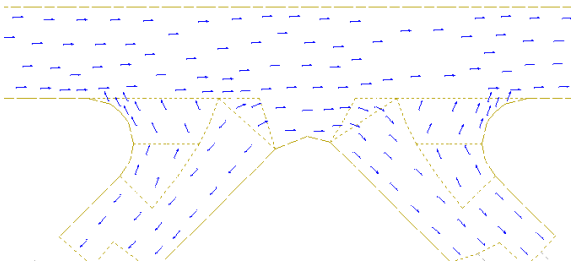
2.3 FEM model

Numerický model bol vyhotovený z doskostenových prvkov v požadovanej geometrií, s hrúbkou steny 4 mm. Bol prisúdený materiál s pracovným diagramom podľa Obr. 4. Sieť konečných prvkov bola zo štvorhranných elementov s dĺžkou hrany maximálne 2 mm, so zahustením pri okrajoch a hranách. V podperách bolo zabránené zvislému posunu vzorky, zároveň bolo zabránené pootočeniu vzoriek okolo osi globálneho súradnicového systému (GSS) X. Obr. 6. Vzorka bola zaťažená na hornej hrane v jej geometrickom strede deformáciou d = 0,9 mm v 15-tich časových krokoch (prírastok pre časový krok Δd = 0,06 mm. V strede bolo zabránené posunu v GSS Y, čo reprezentuje stabilizáciu horného pásu pred vybočením. Analýza bola geometricky a materiálovo nelineárna.

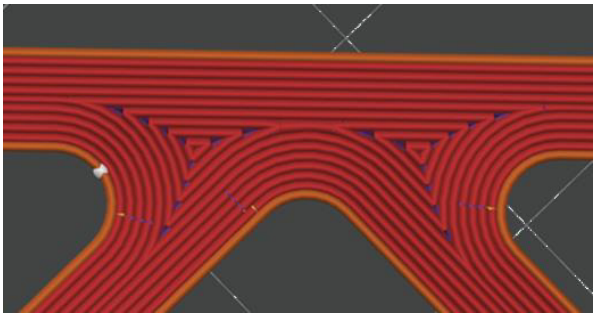


Obr. 6 FEM Model.

V modeli bola zohľadnená orientácia vlákien, rozdelením stenových prvkov na menšie časti v ktorých bola upravená orientácia lokálneho súradnicového systému (LSS), tak aby susedné elementy nemali odklon osí LSS viac ako 67,5°. Obr. 7 a Obr. 8.



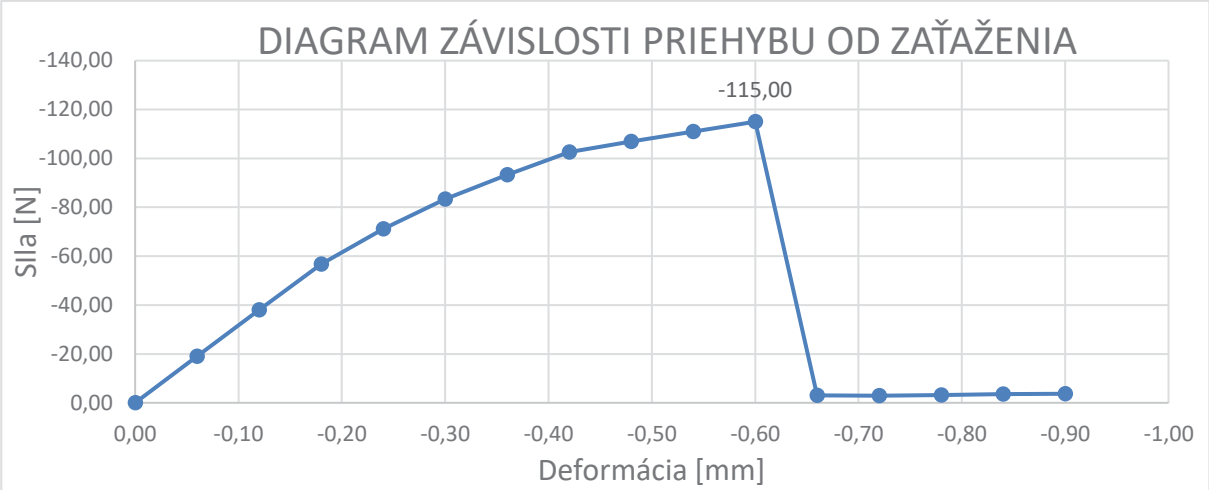
Obr. 7 FEM Model - Orientácia lokálnej osi X plošných prvkov v uzle .



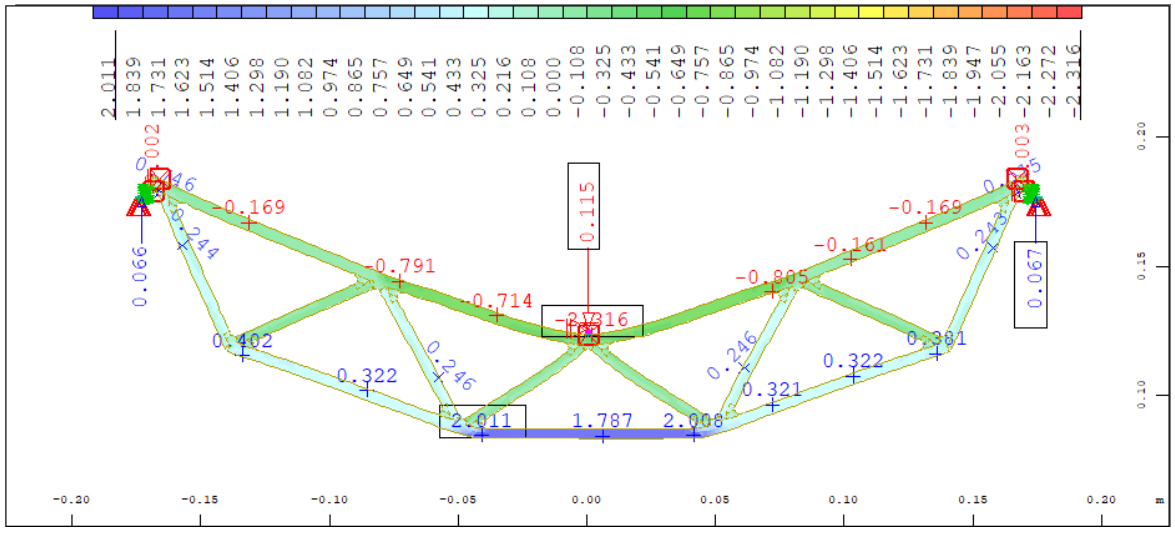
Obr. 8 Model nosníka pripraveného pre tlač - Orientácia vlákien nosníka v uzle.

3. Výsledky

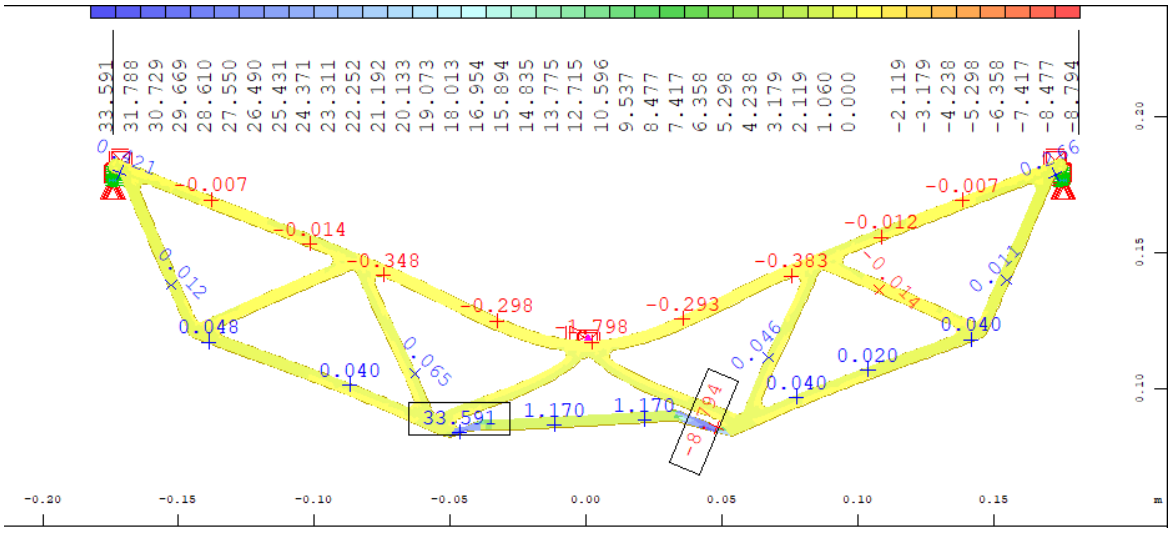
Pre overenie spoľahlivosti modelu bol vykonaný test konvergencie siete v programe SOFiSTiK so zmenou dĺžky hrany elementu z 4 mm na 2 mm a 1 mm. Ako sledovaný parameter bolo zvolené normálové napätie v smere osi x (σ_x) v kritickej oblasti priehradového nosníka. Rozdiel medzi dvomi sieťami (4 mm a 2 mm) predstavoval 3,63 % a medzi sieťami (2 mm a 1 mm) predstavoval 3,45 %. FEM simulácia dosiahla zlyhanie v kroku LC109 pri posunu uzla $u_{z,09}$ = -0,60 mm, dosiahnutá sila v uzle bola $F_{z,09}$ = -115,0 N. V kroku LC110 bolo pozorovaný prudký pokles sily v uzle na $F_{z,10}$ = 3,1 N, Obr. 9.
Obr. 10 a Obr. 11 zobrazujú pomerné pretvorenie v LSS x. Pomerné pretvorenie v kroku LC109 $\varepsilon_{x,09}$ = 2,011 ‰, Zlyhanie je možné pozorovať pri ľavom uzle priehradovky pod vrcholom, kde pomerné pretvorenie narástlo na $\varepsilon_{x,10}$ = 33,591 ‰.



Obr. 9 Diagram závislosti priehybu od zaťaženia

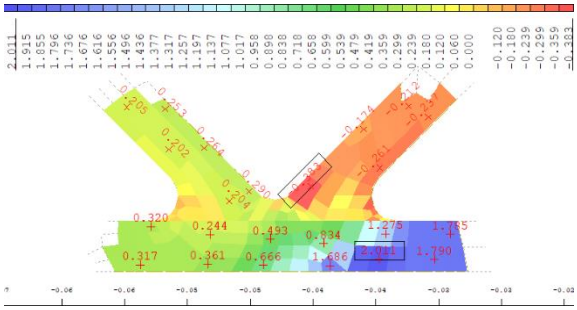


Obr. 10 Pretvorenie v lokálnom smere X v kroku LC 109.

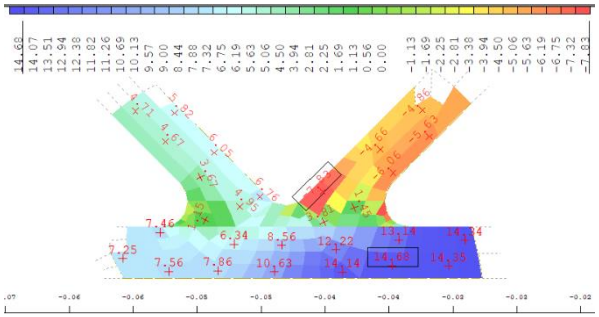


Obr. 11 Pretvorenie v lokálnom smere X v kroku LC 110.

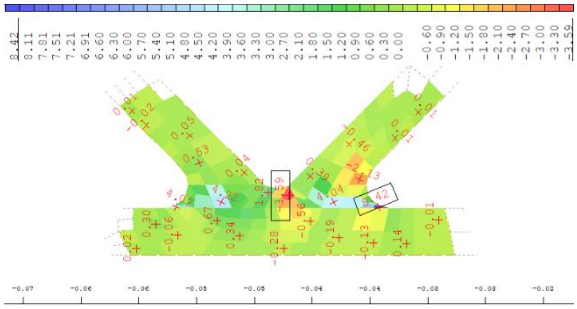
Na nasledujúcich obrázkoch je zobrazený ľavý uzol pod vrcholom na dolnom páse priehradovky, v kroku LC109. Obr. 12, Obr. 13, Obr. 14 a Obr. 15



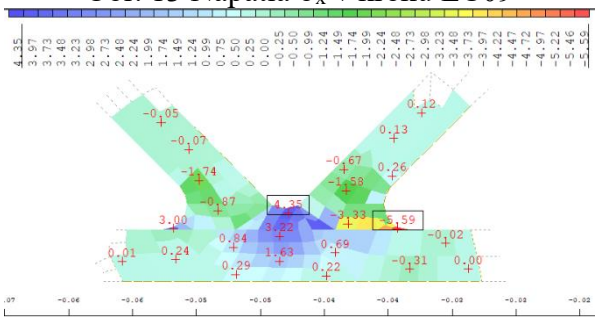
Obr. 12 Pretvorenia ε_x v kroku LC09



Obr. 13 Napätia σ_x v kroku LC09



Obr. 14 Napätia σ_y v kroku LC09



Obr. 15 Napätia τ_{xy} v kroku LC09

4. Záver

Test konvergencie siete preukázal, že zvolená hustota siete poskytuje dostatočnú presnosť pre inžinierske hodnotenie. Na základe týchto výsledkov bola pre ďalšie analýzy zvolená sieť s dĺžkou elementu 2 mm. Kapacita danej skúšobnej vzorky bola stanovená na 115,0 N, pri stlačení v lise o 0,6 mm, pri skúške trojbodovým ohybom. Pre dosiahnutie tejto odolnosti bolo potrebné stabilizovať horný pás priehradovky v mieste zaťažovania voči posunu kolmo na rovinu nosníka.

Táto analýza slúži ako podklad pre experimentálne skúšanie vzorky stanovených rozmerov, čo predstavuje prvý krok v experimentálnom skúšaní vzoriek skutočných rozmerov nosných prvkov v konštrukciách. 3D tlač nosných prvkov predstavuje perspektívny prístup umožňujúci topologickú optimalizáciu individuálnych komponentov a zároveň jednoduchú výrobu prvkov s vysokou mierou geometrickej atypickosti.

Špeciálnu pozornosť je potrebné venovať uzlom týchto nosníkov, kde je kľúčová orientácia lokálnych osí elementov pre vystihnutie skutočného stavu napätosti. Zjednodušený model predstavený v tejto štúdií je možné považovať v tomto ohľade za konzervatívny, keďže tok napätí so zmenšením uhlov LSS medzi susednými bude plynulejší a špičky šmykových napätí τ_{xy} a normálových σ_y budú redukované.

Po overení výpočtového modelu experimentálnym skúšaním na zmenšených modeloch bude nasledovať numerická analýza nosných prvkov skutočných rozmerov. Bude potrebné preskúmať aj zhodu numerických modelov z objemových prvkov, s modelom z doskových prvkov a budúcim experimentom.

Literatúra

[1] GHANBARI-GHAZIJAHANI, T. et al. 2022. 3D printed honeycomb cellular beams made of composite materials (plastic and timber). In Construction and Building Materials [online]. 2022. Vol. 315, s. 125541. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821032797>.

[2] WANG, S. et al. 2020. Effects of fused deposition modeling process parameters on tensile, dynamic mechanical properties of 3D printed polylactic acid materials. In Polymer Testing [online]. 2020. Vol. 86, s. 106483. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941820301793>.

[3] HU, Y. et al. 2016. Fabrication and mechanical behaviors of corrugated lattice truss composite sandwich panels. In Composites Science and Technology [online]. 2016. Vol. 125, s. 114–122. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026635381630029X>.

[4] MUKHERJEE, S. et al. 2021. Accelerating Large-scale Topology Optimization: State-of-the-Art and Challenges. In Archives of Computational Methods in Engineering [online]. 2021. Vol. 28, no. 7, s. 4549–4571. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09544-3>.

[5] HUANG, Y. et al. 2021. In the mix: The effect of wood composition on the 3D printability and mechanical performance of wood-plastic composites. In Composites Part C: Open Access [online]. 2021. Vol. 5, s. 100140. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666682021000359>.

[6] KRAPEŽ TOMEC, D. et al. 2024. Effect of thermal modification of wood particles for wood-PLA composites on properties of filaments, 3D-printed parts and injection moulded parts. In European Journal of Wood and Wood Products [online]. 2024. Vol. 82, no. 2, s. 403–416. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00107-023-02018-2>.

[7] JASIŃSKI, W. et al. 2025. 3D Printing Wood–PLA Composites: The Impact of Wood Particle Size. In Polymers [online]. 2025. Vol. 17, no. 9, s. 1165. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/9/1165>.

[8] ISO 527-4:2023. Plastics — Determination of tensile properties

[9] EN 310:1993 - Wood-based panels - Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength.

Lucia Kondrlová [1]
Študijný program: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: 2

EXPERIMENTÁLNA ANALÝZA ŠÍRKY TRHLÍN V GFRP VYSTUŽENÝCH NOSNÍKOCH: POROVNANIE S NORMOVÝMI MODELMI

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF CRACK WIDTH IN GFRP-REINFORCED BEAMS: A COMPARISION WITH DESIGN MODELS

Abstract
Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) reinforcement is an effective alternative to steel in corrosive environments. However, its low modulus of elasticity makes the serviceability limit state (SLS), particularly crack width, a critical design factor. This paper presents an experimental study on the flexural behavior of concrete beams reinforced with two types of GFRP bars (sand-coated and helically-wrapped) and conventional steel reinforcement. The development of crack widths was monitored at progressive load levels up to failure. These experimental results were compared with theoretical predictions from design codes (EC2, ACI 440.1R, and CSA S806-12). The study analyzes the influence of reinforcement type and surface treatment on cracking behavior and evaluates the accuracy of current code provisions.

Kľúčové slová / Key Words
betónový nosník, GFRP výstuž, šírka trhliny, experimentálne overenie

Úvod

Neustály dopyt po trvanlivých a cenovo dostupných materiáloch je hybnou silou inovácií v stavebníctve, najmä v segmente železobetónových konštrukcií. V tomto kontexte predstavuje výstuž z polymérov zosilnených sklenými vláknami (GFRP) alternatívu k tradičnej oceli, pričom ponúka benefity ako vysoká odolnosť voči korózii či odolnosť voči chemickým vplyvom, ako aj relatívne nízku objemovú hmotnosť [1,2,3]. Viaceré výskumy preukazujú, že použitie GFRP výstuže môže viesť k predĺženiu životnosti konštrukcií a zníženiu nákladov na údržbu v porovnaní s prvkami vystuženými tradičnou betonárskou oceľou [4,5].

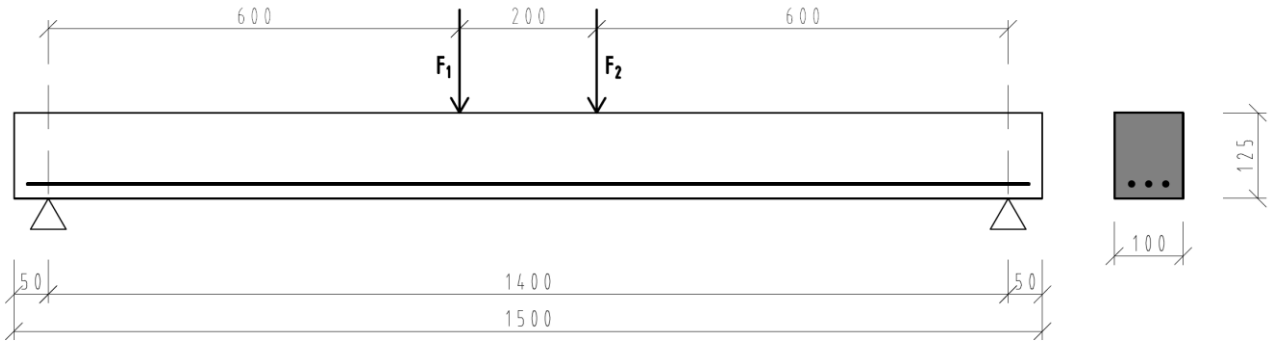
Napriek týmto výhodám je aplikácia GFRP výstuže spojená so špecifickými výzvami, ktoré pramenia najmä z jej nižšieho modulu pružnosti. V dôsledku toho majú betónové nosníky s GFRP výstužou tendenciu vykazovať podstatne väčšie deformácie a širšie trhliny - v niektorých prípadoch až štvornásobné - oproti prvkom s betonárskou výstužou [6,7]. Ďalšou nevýhodou je riziko krehkého porušenia bez predchádzajúceho varovného signálu v dôsledku lineárnej závislosti medzi napätím a pomerným pretvorením. Z tohto dôvodu sa pri návrhu takýchto konštrukcií stáva kľúčovým kritériom posúdenie medzného stavu používateľnosti.

Tento príspevok je zameraný na experimentálne vyhodnotenie dát, ktoré mapujú vznik a šírenie trhlín a celkovú odolnosť skúmaných prvkov.

[1] Lucia, Kondrlová, **Ing.**, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

1. Metodika experimentu a charakteristiky vzoriek

Predkladaná štúdia sa zameriava na experimentálne overenie ohybového správania železobetónových nosníkov vystužených GFRP výstužou s hlavným cieľom sledovať ohybovú odolnosť a analyzovať spôsob vzniku a šírenia trhlín. Pre tento účel bola zvolená konfigurácia štvorbodovej ohybovej skúšky, ktorej schéma je znázornená na Obr. 1. Zvolená schéma poskytuje vytvorenie oblasti s konštantným ohybovým momentom medzi bodmi zaťaženia osovou silou, čo umožňuje detailné pozorovanie vývoja ohybových trhlín a rozloženia napätia v materiáloch.



Obr. 1 Schéma skúšobnej zostavy

Experimentálny program zahŕňal súbor 16 nosníkov s identickými rozmermi prierezu s výškou 125 mm, šírkou 100 mm a celkovou dĺžkou 1500 mm. Rozpätie bolo pri všetkých vzorkách 1400 mm.

Testované nosníky boli rozdelené do troch skupín podľa typu a povrchovej úpravy použitej výstuže: GFRP výstuž s opieskovanou povrchovou úpravou, GFRP výstuž s povrchovou úpravou s ovinutím a referenčná séria so štandardnou rebierkovou betonárskou výstužou.

Pre zjednodušenú identifikáciu bol každému nosníku pridelený kód v tvare NXX.Y, kde „XX“ označuje sériu s rovnakým typom a plochou výstuže a „Y“ predstavuje poradové číslo nosníka v danej sérii. Detailné charakteristiky jednotlivých skúšobných vzoriek, vrátane konfigurácie výstuže $Ø$, hrúbky krycej vrstvy betónu c a stupňa vystuženia ρ_s sú zosumarizované v Tab. 1.

Tab. 1 Charakteristiky skúšaných nosníkov

Ozn.	Typ výstuže	$Ø$ [mm]	c [mm]	ρ_s [-]
N01.1	GFRP opieskovaná	3Ø8	18,1	0,015
N01.2	GFRP opieskovaná	3Ø8	20,0	0,015
N02.1	GFRP opieskovaná	3Ø10	17,2	0,023
N02.2	GFRP opieskovaná	3Ø10	15,7	0,023
N03.1	GFRP opieskovaná	2Ø10 1Ø8	16,4	0,020
N03.2	GFRP opieskovaná	2Ø10 1Ø8	17,7	0,021
N04.1	Betonárska výstuž	2Ø6	17,4	0,006
N04.2	Betonárska výstuž	2Ø6	32,8	0,007
N05.1	Betonárska výstuž	3Ø6	18,3	0,008
N05.2	Betonárska výstuž	3Ø6	19,6	0,008
N06.1	GFRP ovinutá	2Ø7	19,2	0,008
N06.2	GFRP ovinutá	2Ø7	19,8	0,008

N07.1	GFRP ovinutá	3Ø7	18,5	0,011
N07.2	GFRP ovinutá	3Ø7	14,5	0,011
N08.1	GFRP ovinutá	4Ø7	18,8	0,015
N08.2	GFRP ovinutá	4Ø7	18,7	0,015

Všetky nosníky boli vybetónované použitím rovnakej betónovej zmesi, ktorá dosiahla priemernú charakteristickú valcovú pevnosť v tlaku 24,45 MPa.

Mechanické vlastnosti betonárskej výstuže zodpovedali deklarovaným hodnotám: priemerná medza klzu bola na úrovni 500 MPa, modul pružnosti sa pohyboval v intervale 215–220 GPa a priemerná pevnosť v ťahu dosiahla 616 MPa.

Vlastnosti GFRP výstuží sa líšili; Prúty GFRP s povrchovou úpravou s ovinutím (priemer 7 mm) dosiahli priemernú pevnosť v ťahu 1070 MPa, čím mierne prekročili deklarovanú hodnotu (>1000 MPa). Ich priemerný modul pružnosti bol však nameraný na úrovni 40 GPa, čo nedosiahlo výrobcom deklarovanú hodnotu (>50 GPa). Naopak, GFRP výstuž s opieskovanou povrchovou úpravou preukázala v priemere o 13–20 % nižšiu pevnosť v ťahu, než uvádzal výrobca (>1100 MPa), a to konkrétne 910 MPa pre priemer 8 mm a 960 MPa pre priemer 10 mm. Modul pružnosti tejto výstuže (52 GPa) zodpovedal špecifikácii výrobcu (>50 GPa).

2. Spôsoby porušenia a šírky trhlín

V počiatočných štádiách zaťažovania sa všetky nosníky vyznačovali typickým ohybovým správaním. Avšak v záverečných fázach, tesne pred porušením, sa vo väčšine prípadov iniciovala rozhodujúca šmyková trhlina, ktorá viedla k porušeniu v šmyku. Toto správanie je dôsledkom zvolenej schémy skúšobnej zostavy, kde bola šmyková odolnosť v porovnaní s ohybovou odolnosťou navrhnutá s menšou bezpečnostnou rezervou. Vďaka časovému rozdielu pri vzniku ohybových a šmykových trhlín boli vytvorené priaznivé podmienky pre detailné pozorovanie rozvoja ohybových trhlín. Táto skutočnosť umožňuje spoľahlivo kvantifikovať deformačnú kapacitu a ohybovú odolnosť bez predčasného ovplyvnenia šmykovými mechanizmami. Súhrn výsledkov, vrátane hodnoty zaťaženia pri porušení $N_{Rd,exp}$, hodnoty vypočítanej odolnosti $N_{Rd,calc}$, typu porušenia a šírky trhlín pri štyroch rôznych úrovniach zaťaženia, sú prezentované v Tab. 2.

Tab. 2 Súhrn vlastností nosníkov, ohybovej odolnosti, spôsobov porušenia a šírky trhlín

Ozn.	Typ výstuže	$N_{Rd,calc}$ [kN]	$N_{Rd,exp}$ [kN]	Typ porušenia	Šírka trhliny (w) pri X % odolnosti [mm]			
					30%	50%	70%	95%
N01.1	GFRP opieskovaná	19,20	19,40	Šmyk	0,10	0,25	0,35	0,50
N01.2	GFRP opieskovaná	19,15	19,70	Šmyk	0,10	0,20	0,30	0,40
N02.1	GFRP opieskovaná	20,98	22,06	Šmyk	0,10	0,15	0,25	0,40
N02.2	GFRP opieskovaná	20,45	20,08	Šmyk	0,05	0,15	0,25	0,35
N03.1	GFRP opieskovaná	20,36	20,11	Šmyk	0,10	0,20	0,30	0,40
N03.2	GFRP opieskovaná	20,30	20,24	Šmyk	0,10	0,20	0,35	0,40
N04.1	Betonárska výstuž	10,09	12,12	Ohyb	0,05	0,20	0,30	0,45
N04.2	Betonárska výstuž	8,24	12,02	Ohyb	0,05	0,10	0,20	0,35
N05.1	Betonárska výstuž	13,91	17,50	Ohyb	0,10	0,15	0,25	0,30
N05.2	Betonárska výstuž	13,52	17,10	Šmyk	0,05	0,10	0,15	0,40

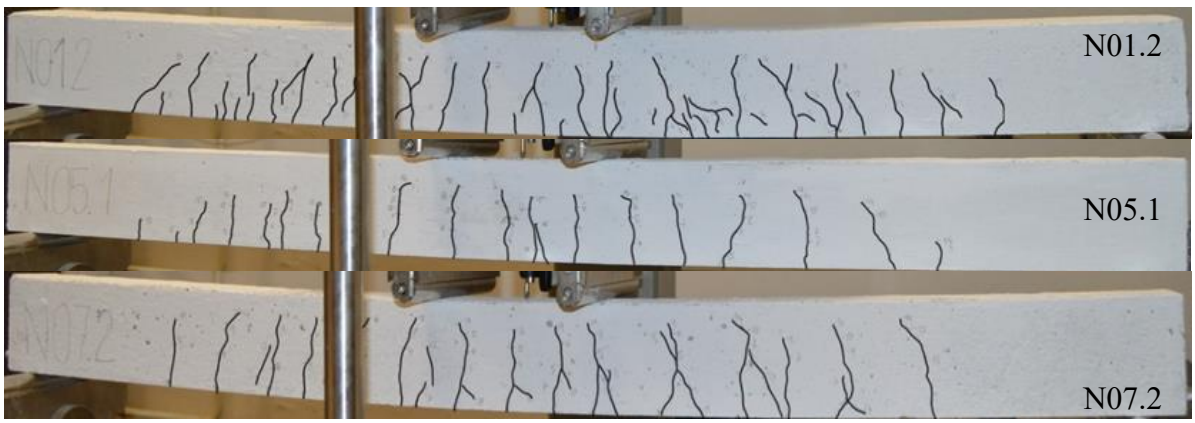
N06.1	GFRP ovinutá	13,63	13,13	Drvenie betónu, šmyk	0,10	0,30	0,40	0,60
N06.2	GFRP ovinutá	14,24	12,21	Šmyk	0,10	0,25	0,60	0,80
N07.1	GFRP ovinutá	16,70	14,73	Dvojitý šmyk	0,05	0,25	0,40	0,70
N07.2	GFRP ovinutá	16,52	15,97	Šmyk	0,15	0,30	0,70	0,80
N08.1	GFRP ovinutá	18,84	17,11	Šmyk	0,10	0,20	0,35	0,60
N08.2	GFRP ovinutá	16,56	16,14	Šmyk	0,05	0,20	0,25	0,35

Vývoj šírky trhlín bol pozorovaný priebežne počas zaťažovania, pričom dáta boli porovnávané pri štyroch referenčných úrovniach: 30 %, 50 %, 70 % a 95 % odolnosti nosníka. Pre zachovanie porovnateľnosti dát boli do analýzy zahrnuté výhradne trhliny lokalizované v oblasti čistého ohybu. Zaznamenané údaje potvrdili nelineárny nárast šírky trhlín s rastúcim zaťažením. Tento proces bol preukázateľne ovplyvnený tromi hlavnými faktormi: typom použitej výstuže, parametrom $Ø/\rho_s$ a kvalitou súdržnosti medzi výstužou a okolitým betónom.

Skupina nosníkov s opieskovanou GFRP výstužou (N01-N03) vykazovala pomerne rovnomerný nárast šírky trhlín. Na prevádzkovej úrovni zaťaženia (30 %) dosahovala šírka len okolo 0,10 mm, zatiaľ čo pri 95 % zaťažení sa pohybovala v rozmedzí 0,35-0,50 mm. Pozorované rovnomerné a husté rozloženie trhlín indikuje efektívnu súdržnosť medzi betónom a daným typom výstuže.

Nosníky s betonárskou výstužou (N04-N05) dosiahli porovnateľné hodnoty šírky trhlín (0,30-0,45 mm pri 95 % zaťažení) aj napriek tomu, že mali výrazne nižší stupeň vystuženia ρ_s.

Najmenej priaznivé správanie z hľadiska kontroly trhlín bolo pozorované pri nosníkoch s GFRP výstužou s povrchovou úpravou s ovinutím (N06-N08). Pri týchto vzorkách bola zaznamenaná maximálna šírka trhliny až 0,80 mm (pri 95 % odolnosti). Vývoj šírky trhlín sa rapídne zrýchlil po prekročení 50 % zaťaženia; obzvlášť pri vzorkách N06.2 a N07.2, kde sa šírka trhlín medzi 50 % a 70 % úrovňou takmer zdvojnásobila. Vzory trhlín boli u tejto skupiny nosníkov menej pravidelné a viac lokalizované, čo potvrdzuje predpoklad slabšej súdržnosti v porovnaní s opieskovanou GFRP výstužou. Napriek tomu sa ako rozhodujúci faktor ukázala povrchová úprava výstuže. Hoci analýza pomeru $Ø/\rho_s$ ukázala, že nižšie hodnoty tohto parametra všeobecne prispievajú k lepšej kontrole trhlín (zatiaľ čo vyššie pomery viedli k širším a menej rovnomerným trhlinám), vplyv súdržnosti bol dominantný – to jasne demonštruje porovnanie vzoriek N01 (opieskovaná) a N07 (ovinutá) - hoci mali podobný charakter usporiadania trhlín (Obr. 2), vzorka N07 s GFRP výstužou s povrchovou úpravou s ovinutím zaznamenala výrazne väčšie šírky trhlín.



Obr. 2 Vzory trhlín pri 95% odolnosti nosníkov

3. Analýza presnosti normových predikcií šírky trhlín

Namerané experimentálne dáta boli porovnávané s teoretickými predikciami vypočítanými podľa troch relevantných noriem: Eurokód 2 (EN 1992-1-1) [8], ACI 440.1R-15 [9] a CSA S806-12 [10]. Priame porovnanie vypočítaných a experimentálnych hodnôt šírky trhlín pri rôznych úrovniach zaťaženia je zhrnuté v Tab. 3. Pre účely porovnania boli v tabuľke uvedené priemerné hodnoty šírok trhlín v rámci rovnakej skupiny nosníkov N0X. Takto upravené hodnoty umožňujú jednoduchšie a prehľadnejšie porovnanie medzi experimentálnymi a výpočtovými výsledkami.

Tab. 3 Porovnanie vypočítaných a experimentálnych šírok trhlín pri 30 %, 50 %, 70 % a 95 % odolnosti pre testované nosníky podľa EN 1992-1-1, ACI 440.1R a CSA S806-12

Ozn.	Šírka trhliny (w) pri X % odolnosti [mm]							
	30%				50%			
	EC2	ACI	CSA	EXP	EC2	ACI	CSA	EXP
N01	0,21	0,17	0,15	0,10	0,35	0,29	0,24	0,23
N02	0,11	0,09	0,08	0,08	0,18	0,15	0,13	0,15
N03	0,12	0,10	0,09	0,10	0,20	0,17	0,15	0,20
N04	0,06	0,10	0,08	0,05	0,16	0,16	0,14	0,15
N05	0,07	0,06	0,06	0,08	0,15	0,10	0,09	0,13
N06	0,21	0,26	0,20	0,10	0,34	0,44	0,34	0,28
N07	0,15	0,14	0,12	0,10	0,26	0,24	0,20	0,28
N08	0,13	0,11	0,09	0,08	0,22	0,19	0,15	0,20
	70%				95%			
	EC2	ACI	CSA	EXP	EC2	ACI	CSA	EXP
N01	0,49	0,40	0,34	0,33	0,66	0,54	0,46	0,45
N02	0,25	0,21	0,18	0,25	0,35	0,28	0,25	0,38
N03	0,29	0,23	0,21	0,33	0,39	0,32	0,28	0,40
N04	0,26	0,23	0,19	0,25	0,39	0,31	0,26	0,40
N05	0,24	0,14	0,13	0,20	0,34	0,19	0,18	0,35
N06	0,48	0,61	0,47	0,50	0,65	0,83	0,64	0,70
N07	0,36	0,34	0,27	0,55	0,49	0,46	0,37	0,75
N08	0,30	0,26	0,22	0,30	0,41	0,35	0,29	0,48

Analýza preukázala, že výpočtový model podľa Eurokódu 2 (EN 1992-1-1) poskytuje vysoko presné predikcie pre nosníky s tradičnou betonárskou výstužou. Aj pri 95 % úrovni zaťaženia nepresiahli odchýlky od nameraných hodnôt 0,01 mm, čo potvrdzuje spoľahlivosť tejto normy pre štandardné železobetónové konštrukcie. Pri aplikácii na GFRP výstuž však bola presnosť EC2 variabilnejšia. Pri prevádzkových úrovniach zaťaženia (30-50 %) sa norma ukázala ako konzervatívna, keďže predpokladané šírky trhlín mierne prekračovali namerané. Naopak, pri vysokých úrovniach zaťaženia (70-95 %) EC2 namerané hodnoty podhodnocoval. Tento efekt bol najvýraznejší pri GFRP výstuži s povrchovou úpravou s ovinutím, kde rozdiely dosahovali 0,2 až 0,3 mm. Tento nesúlad poukazuje na obmedzenia výpočtového modelu EC2, ktorý je kalibrovaný na správanie výstuže s dobrou súdržnosťou (betonárska oceľ alebo GFRP výstuž s opieskovanou

povrchovou úpravou), ale nedokáže adekvátne zachytiť správanie výstuže s horšími adhéznymi vlastnosťami.

Naopak, normy ACI 440.1R-15 a CSA S806-12 vo všeobecnosti lepšie zachytili nelineárny charakter vývoja trhlín pri GFRP výstuži. Ich výpočtové formulácie zohľadňujú postupné formovanie trhlín bez predpokladu ich úplnej stabilizácie. Obe normy vykazovali dobrú zhodu s experimentom pri nízkych (prevádzkových) úrovniach zaťaženia. Pri vyšších zaťaženiach však obe systematicky podhodnocovali reálne šírky trhlín, a to pri všetkých testovaných typoch výstuže. Z porovnania ACI a CSA vyplýva, že norma CSA je štandardne menej konzervatívna a predikuje hodnoty o 5-10 % nižšie ako ACI. Napríklad v prípade nosníka N07.1 pri 95 % zaťažení bola experimentálna hodnota 0,75 mm, zatiaľ čo ACI predikovala 0,46 mm (podhodnotenie o 0,29 mm) a CSA len 0,37 mm (podhodnotenie až o 0,38 mm).

Experiment potvrdil výrazne nelineárny priebeh nárastu šírky trhlín, obzvlášť pri nosníkoch s GFRP výstužou s povrchovou úpravou s ovinutím. Pri posudzovaní na úrovni prevádzkového zaťaženia (približne 30 % odolnosti) sa ukázala relatívna presnosť všetkých noriem, hoci každá bola optimálna pre iný typ výstuže: EC2 pre betonársku výstuž, ACI 440.1R pre GFRP výstuž s opieskovanou povrchovou úpravou a CSA S806-12 pre GFRP výstuž s povrchovou úpravou s ovinutím. Tieto zistenia indikujú, že hoci všetky tri normy predstavujú vhodný nástroj na posúdenie medzného stavu použiteľnosti, ani jeden z modelov nedokáže spoľahlivo a presne zachytiť vývoj šírky trhlín v celom rozsahu zaťaženia až po dosiahnutie porušenia prvku.

Záver

Z realizovaných experimentálnych skúšok a následného porovnania nameraných dát s teoretickými predpokladmi podľa relevantných noriem vyplývajú nasledujúce závery:

- Výsledky experimentu potvrdili, že zvýšenie stupňa vystuženia ρ_s vedie k vyššej ohybovej odolnosti a súčasne k efektívnejšej kontrole šírky trhlín. Tento priaznivý vplyv bol pozorovaný pri všetkých typoch výstuže, avšak najvýraznejší bol pri prútoch s lepšou súdržnosťou (betonárska výstuž a GFRP s opieskovanou povrchovou úpravou).
- Pri porovnaní skúmaných GFRP výstuží poskytla výstuž s opieskovanou povrchovou úpravou najlepšie výsledky pri prevádzkových úrovniach zaťaženia. Dôvodom sú priaznivé podmienky súdržnosti, ktoré umožnili efektívny prenos napätí a rovnomernejšie rozloženie trhlín.
- GFRP výstuž s povrchovou úpravou s ovinutím vykazovala výraznejšie šírky trhlín a nižšiu výslednú odolnosť aj pri porovnateľných stupňoch vystuženia, čo poukazuje na negatívny vplyv zníženej súdržnosti a menšej efektívnej plochy jadra prierezu prúta.
- Referenčné nosníky vystužené štandardnou betonárskou výstužou preukázali konzistentné a tvárne správanie, charakterizované stabilným rozvojom trhlín a ich relatívne malými konečnými šírkami.
- Z hľadiska porovnania s normovými výpočtami poskytla norma EN 1992-1-1 celkovo najlepšiu zhodu s experimentálnymi výsledkami, a to aj pri aplikácii na prvky vystužené GFRP výstužou.
- Pri detailnejšom pohľade na prevádzkové úrovne zaťaženia sa ukázalo, že optimálny výpočtový model závisí od typu výstuže: Eurokód 2 bol najpresnejší pre štandardnú betonársku výstuž, ACI 440.1R dosiahol najvernejšie predikcie pre GFRP výstuž s opieskovanou úpravou a model CSA S806-12 sa ukázal ako najvhodnejší pre GFRP výstuž s povrchovou úpravou s ovinutím.

Literatúra

[1] Barris C., Torres L., Vilanova I., Miàs C., Llorens M. Experimental study on crack width and crack spacing for Glass-FRP reinforced concrete beams. Engineering Structures, 2017, 131.

[2] Wu C., Su Y., Zhang P., Zhu H., Gao D., Sheikh S. A. Experimental Study of GFRP Reinforced Concrete Beams With U-Shaped CFRP Grid-Reinforced ECC. Frontiers in Materials, 2022, 9.

[3] fib Task Group 5.1. Fib Bulletin 90: Externally Applied FRP Reinforcement for Concrete Structures; Task Group 5.1 Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for concrete structures: Lausanne, Switzerland, 2019.

[4] Brózda K., Selejdak J., Koteš P. Analysis of the crack width of beams reinforced with FRP bars. Technical Transactions, 2018, 11.

[5] Codina A., Barris C., Jahani Y., Baena M., Torres L. Assessment of fib Bulletin 90 Design Provisions for Intermediate Crack Debonding in Flexural Concrete Elements Strengthened with Externally Bonded FRP. Polymers, 2023, 15.

[6] Singh P., Ahmad S. An Analytical Study on Flexural Behavior of Concrete using Glass Fiber Reinforced Polymer Bars. IRJET, 2021, 8.

[7] Gouda O., Hassanein A., Galal K. Experimental and numerical study on the crack width and deflection performance of GFRP reinforced concrete beams. Engineering Structures, 2023, 283.

[8] EN 1992-1-1: 2023, Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Brussels: CEN, 2023.

[9] ACI Committee 440.1R-15. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. American Concrete Institute. 2015.

[10] CAN/CSA S806-12, Design and Construction of building Components with Fiber-Reinforced Polymers. Mississauga, ON, Canada: Canadian Standards Association, 2012.

Anna Kováčová [1]
Študijný program: teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, ročník: 3

NÁVRH VZORIEK ŠTÍHLYCH BETÓNOVÝCH STĹPOV

DESIGN OF SLENDER CONCRETE COLUMN SPECIMENS

Abstract
Due to the continuous improvement of construction materials, architectural design increasingly aim to reduce the cross-sections of load-bearing elements. As a result of environmental impacts, there has been a growing number of studies focused on more sustainable versions of concrete. This article describes the design of dimensions, cross-section and properties of theoretically analyzed slender columns. The investigated columns fail inside of their interaction diagram. A selected columns will be tested in the Central Laboratory of the Faculty of Civil Engineering at the Slovak University of Technology in Bratislava.

Kľúčové slová / Key Words
štíhly betónový stĺp, vzorka, strata stability, nelineárny výpočet

1. Úvod

Tento článok je zameraný na návrh vzoriek štíhlych betónových stĺpov, ktoré majú zlyhať krehkým porušením vnútri ich interakčného diagramu. Samotnému experimentálnemu testovaniu predchádza teoretická (výpočtová) analýza stĺpov.

Táto časť výskumu vychádzala zo zistení predchádzajúcich štúdií, teoretických základov platných európskych noriem, ako aj v neposlednom rade z odbornej a vedeckej literatúry. Zároveň sa zameriavala na prehĺbenie poznatkov v oblasti nelineárnej analýzy. Na základe vyššie uvedených poznatkov, som vytvorila nové nelineárne numerické modely už skôr testovaných stĺpov [3] s cieľom určiť najpresnejší spôsob zachytenia ich správania.

Následne som pristúpila k príprave experimentu, ktorý mal potvrdiť predom stanovené hypotézy a zároveň odlíšiť tento výskum od existujúcich štúdií. Cieľom bolo splniť dve hlavné požiadavky – dosiahnuť zlyhanie stĺpa vnútri interakčného diagramu nad hodnotou *Fcd,lim* a overiť spoľahlivosť metódy nominálnej krivosti porovnaním s nelineárnou metódou.

Nelineárne výpočty vyžadujú veľké množstvo skúseností a s ohľadom na predošlé odborné práce venujúce sa tejto problematike je zrejmé, že ani skúsenosti nie sú zárukou správneho výsledku. Kvôli týmto dôvodom som sa snažila o precíznosť výsledkov a zvolených výpočtových postupov.

Po definovaní vyššie uvedených kritérií som pristúpila k samotnému návrhu parametrov a vlastností testovaných stĺpov. Bolo nutné zadefinovať: rozmery stĺpa ako sú dĺžka, výška a šírka prierezu, trieda použitého betónu, počet a priemer výstuží prierezu, počiatočnú excentricitu e_0 a samotný spôsob zaťažovania stĺpa.

[1] Anna, Kováčová, **Ing.**, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

2. Návrh vzoriek

Po vykonaní desiatok kombinácií sa mi podarilo určiť vhodný prierez, ktorý zodpovedal stanoveným požiadavkám. Keďže výskum úzko nadväzuje na praktické využitie, rozhodla som sa použiť materiály bežne dostupné v stavebnej praxi. Stĺpy boli navrhnuté v mierke 1:2. Výsledný prierez mal šírku 350 mm a výšku 150 mm.

Výška prierezu bola limitovaná teóriou prútových prvkov, pričom nesmela presiahnuť štvornásobok šírky. Percento výstuže bolo obmedzené na maximálnu hodnotu 4%. Trieda betónu bola zvolená C40/50 a počiatočná excentricita bola stanovená tak, aby stabilitné zlyhanie nastalo v hornej časti interakčného diagramu, nad hodnotou *Fcd,lim,* pričom výsledná excentricita nemala byť menšia ako 20 mm alebo h/3. Okrem týchto požiadaviek bolo cieľom dosiahnuť, aby bol stĺp namáhaný tlakom, čo znamenalo, že návrhová sila musela byť vyššia ako *Fcd,lim,* vypočítaný podľa rovnice (1).

$$F_{cd.lim} = x_{lim} * b * f_{cd} \tag{1}$$

kde x_{lim} je limitná poloha neutrálnej osi
b šírka stĺpa
f_{cd} návrhová pevnosť betónu v tlaku

3. Nelineárne výpočty

Stĺpy boli posudzované viacerými výpočtovými programami. V prvom kroku boli riešené výpočtovým programom Stab2DNL a metódou nominálnej krivosti. Metóda nominálnej krivosti bola počítaná dvakrát. Prvýkrát podľa vzťahov európskej normy [1] a druhýkrát bola táto metóda korigovaná a upravená reálne možnými dosiahnuteľnými hodnotami pomerných pretvorení v ťahanej a tlačenej výstuži.

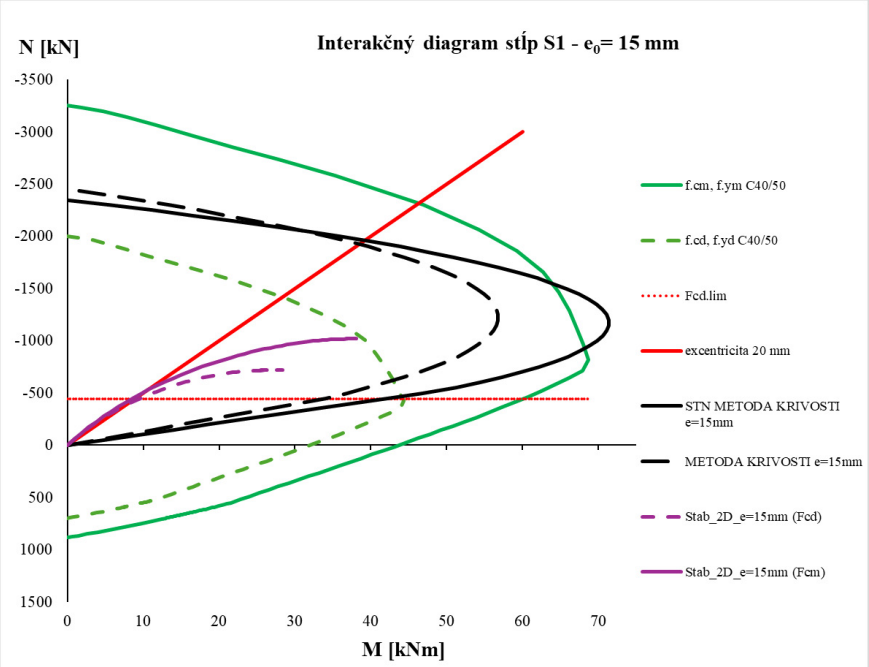
V nižšie uvedenej tabuľke Tabuľka 1. sa uvádza súhrn rôznych posudzovaných a skúmaných prierezov, ktoré boli podrobené nelineárnej analýze. Tieto stĺpy nám poskytli ďalšie smerovanie návrhu z hľadiska excentricity a vyššieho podielu výstuže v priereze. Počas prvotných analýz sa excentricity pohybovali v rozmedzí od 20-40 mm.

Tabuľka 1: Analyzované prierezy

Betón triedy C40/50							
Označenie	Šírka prierezu	Výška prierezu	Výška stĺpa	Štíhlosť	Priemer výstuže	Počet výstuží	Percentuálne vystuženie
	[mm]	[mm]	[m]	[-]	[mm]	[ks]	[%]
S1	0,25	0,55	9	124,71	20	12	2,7418
S2	0,25	0,55	7	97,00	20	12	2,7418
S3	0,25	0,55	7	97,00	25	10	3,5700
S4	0,20	0,40	6	103,92	18	8	2,5447
S5	0,20	0,40	3,8	65,82	18	8	2,5447
S6	0,20	0,40	3,8	65,82	16	10	2,5133
S7	0,15	0,35	3,8	87,76	16	8	3,0638
S8	0,15	0,35	3,8	87,76	18	8	3,8776

Na experimentálne overenie bol, ako výsledok experimentálnej analýzy, zvolený stĺp s označením S7. Trieda betónu je zvolená C40/50 a betonárska výstuž triedy B 500B. Rozmery prierezu sú 150 mm x 350 mm.

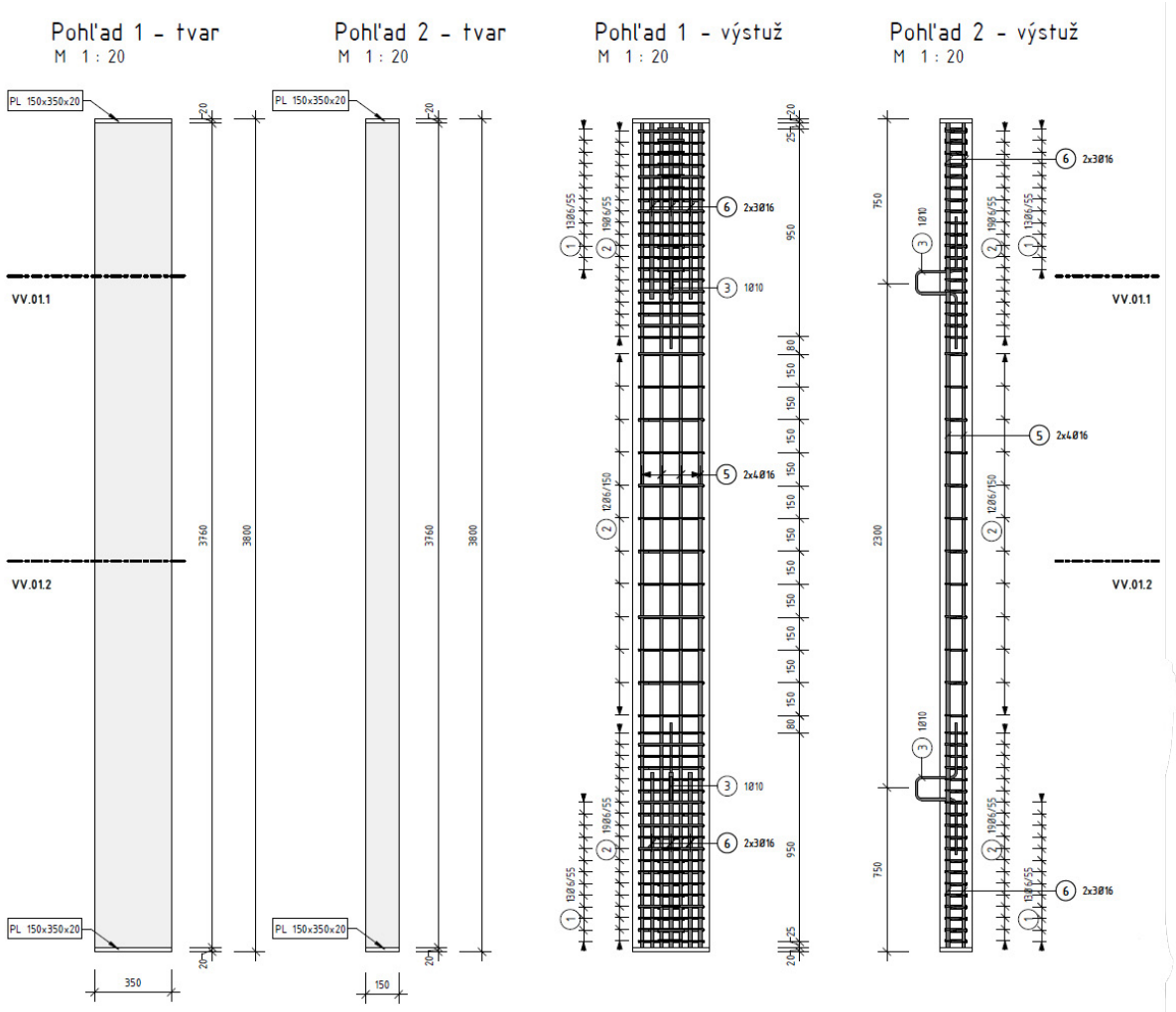
Ďalším krokom návrhu bolo stanovenie počiatočnej excentricity normálovej sily e_0. Vykonali sa viaceré analýzy s rôznymi hodnotami excentricít t.j, 3 mm, 5 mm, 10 mm a 15 mm. Zvolený skúmaný stĺp má excentricitu e_0= 15 mm (vrátane excentricity od imperfekcií). Pôvodne siedmy stĺp vpred experimentálnej analýze sa premenoval na stĺp S1, ktorý sa pripravuje na experimentálne overenie.



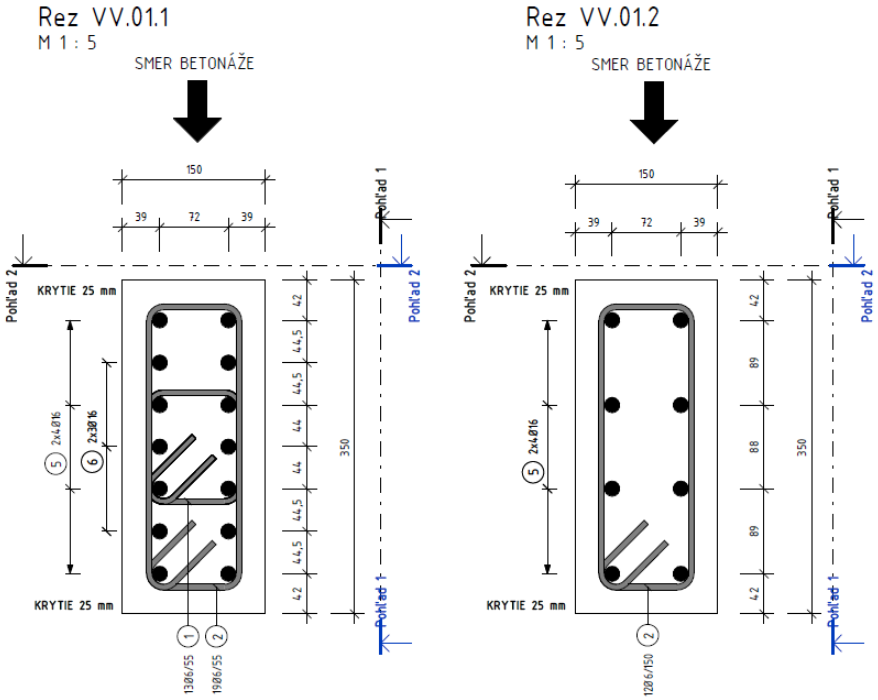
Obrázok 1: Interakčný diagram stĺpa S1 s excentricitou e_0= 15mm

4. Vystuženie stĺpa

Vystuženie stĺpa pozostáva z ôsmich výstuží priemeru 16 mm. Na oboch stranách stĺpa sú umiestnené 4 prúty. Strmene majú priemer 6 mm a sú rôzne rozmiestnené pozdĺž stĺpa. V strednej časti stĺpa sú s rozostupom 150 mm. V hlave a v päte stĺpa sú zhustené na rozostupy po 55 mm. Aby sa zabránilo možným porušeniam koncov stĺpa, bude okrem zhustenia strmeňov v hlave a v päte stĺpa umiestnených ďalších 6 prútov pozdĺžnej výstuže s priemerom 16 mm. Všetka pozdĺžna výstuž bude následne privarená na oceľové platne hrúbky 20 mm, ktoré budú umiestnené na oboch koncoch. Tento spôsob riešenia bol zvolený kvôli priamemu prenosu časti sily rovno do výstuže, aby sa zabránilo prípadnému vzniku trhlín v betóne priamo pod oceľovými platňami.



Obrázok 2: Tvar a schéma vystuženia stĺpa



Obrázok 3: Priečny rez stĺpa

5. Záver

Stĺp S1 s prierezom znázorneným na Obrázku 3 bol analyzovaný pomocou viacerých výpočtových softvérov a spĺňal všetky podmienky stanovené na experimentálne overenie. Na základe výsledkov nelineárnej analýzy sa predpokladá, že na stĺpe nevzniknú trhliny pred stratou stability, čo potvrdzuje krehký charakter porušenia.

Celková excentricita (súčet počiatočnej plánovanej excentricity a excentricity spôsobenej deformáciami v strede stĺpa) mala presiahnuť minimálnu počiatočnú excentricitu stanovenú normou STN EN 1992 – 1 – 1 [1] pre navrhovanie kritických prierezov, ktorá je pre náš stĺp min. 20 mm. Materiálové parametre použité vo výpočtoch zodpovedajú stredným hodnotám, keďže tieto hodnoty majú reprezentovať reálne správanie materiálu a zároveň sú požadované normou [1].

Literatúra

[1] STN EN 1992-1-1: 2006 (73 1201) Eurokód 2- Navrhovanie betónových konštrukcií. Časť 1-1: Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy, 2006

[2] DOBRÝ, J.: Nonlinear analysis of slender reinforced concrete columns. Bratislava : s.n., 2021.

[3] KENDICKÝ, P. Numerická a experimentálna analýza štíhlych betónových stĺpov. Bratislava, 2017.

[4] 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.

[5] BENKO, V. - STRAUSS, A. - TAUBLING, B. - VALAŠÍK A.- ČUHÁK, M.- a kol.: Reliability of slender columns, *Beton - und Stahlbeton*, vol. 112, 2017

[6] 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.

***Jakub Kozmon*[1]**
Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 2. ročník

ANALÝZA VPLYVU TYPICKÝCH PORÚCH PANELOVÝCH BYTOVÝCH DOMOV NA ÚNOSNOSŤ A TUHOSŤ STYKOV A MOŽNOSTI ICH NEDEŠTRUKTÍVNEHO SKÚŠANIA

EVALUATING THE INFLUENCE OF COMMON DEFECTS IN LARGE PANEL SYSTEM BUILDINGS ON JOINT PERFORMANCE AND FEASIBILITY OF NON-DESTRUCTIVE TESTING.

Abstract
As the projected design service life of a vast segment of Large Panel System (LPS) dwellings nears its end, a robust understanding of their structural assessment and testing is crucial. This paper analyses the occurrence and types of defects in structural joints, investigating their influence on joint performance. Joint bearing capacity and stiffness are calculated using the analytical approach specified in the STN 73 1211 standard. These analytical findings are then compared with the outcomes of a nonlinear numerical analysis.
The analysis concludes that defects in the concrete filling and assembly deviations have the greatest impact on joint capacity and stiffness. In-situ reinforcing steel not only influence joint bearing capacity but also enhances structural robustness against progressive collapse under accidental loads. Therefore, this study investigates the application of various Non-Destructive (ND) methods to identify and quantify the most critical defects within LPS building joints.

Kľúčové slová / Key Words
Panelové domy, Spoje, Prefabrikované konštrukcie, Hodnotenie existujúcich konštrukcií, Nedeštruktívne skúšanie

1. Úvod

Prefabrikované panelové bytové domy, rozšírené v Európe v druhej polovici 20. storočia, sú tvorené plošnými stenovými a stropnými dielcami, ktoré sú spájané nosnými stykmi, čím vytvárajú tuhú priestorovú konštrukciu. Mnohé z týchto stavieb sa v súčasnosti blížia alebo už prekročili svoju projektovanú návrhovú životnosť (50 rokov). Táto skutočnosť spolu s prebiehajúcou obnovou vyvoláva naliehavú potrebu ich statického posudzovania a diagnostiky. Tento fenomén reflektuje aj nárast publikácií a to najmä v európskych krajinách a Rusku [1].
Hoci ku kolapsom konštrukcií dochádza zriedkavo a sú obvykle spojené s mimoriadnym zaťažením (napr. výbuch plynu [2]), dlhodobá spoľahlivosť starnúcich panelových konštrukcií je naďalej predmetom skúmania. Doterajší výskum však naznačuje, že pri správnej údržbe môže reálna životnosť týchto budov presiahnuť 100 až 150 rokov [3], [4], [5]. Kľúčová je údržba obvodového a strešného plášťa, ktorá zamedzuje prenikaniu vody do spojov, a tým chráni oceľové prvky pred koróziou. Dôležitou súčasťou údržby sú pravidelné prehliadky a kontroly, pričom literatúra [6] odporúča vizuálne kontroly každých 5 rokov, podrobnejšiu kontrolu nosných stykov každých 15

[1] Jakub Kozmon, Ing., Slovenská Technická Univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovensko

rokov a detailné statické posúdenie každých 30 rokov. Podrobné posúdenie, vyžadované aj pri zásadných zásahoch do nosnej konštrukcie, využíva makroskopické prehliadky a deštruktívne/nedeštruktívne skúšanie na presné určenie skutočného stavu objektu, vrátane identifikácie porúch.
Poruchy a vady priamo ovplyvňujú celkovú únosnosť a tuhosť stykov. Avšak, zisťovanie ich materiálových vlastností je vzhľadom na komplexnú geometriu, rôznorodosť materiálov a prekrytie stykov komplikované. Navyše, aplikácia súčasných invazívnych (deštruktívnych) metód je obmedzená prítomnosťou obyvateľov. Preto si diagnostika panelových domov vyžaduje nové prístupy, ktoré minimalizujú deštruktívne zásahy a zároveň umožňujú presné posúdenie aktuálneho stavu stykov [7].
Cieľom tejto práce je analyzovať výskyt a typy porúch stykov naprieč rôznymi konštrukčnými systémami v rôznych krajinách, kvantifikovať vplyv týchto porúch na únosnosť a tuhosť stykov a napokon analyzovať možnosti použitia nedeštruktívnych metód na efektívnu identifikáciu a kvantifikáciu porúch spojov panelových konštrukcií.

2. Analýza typických porúch vyskytujúcich sa v panelových bytových domoch

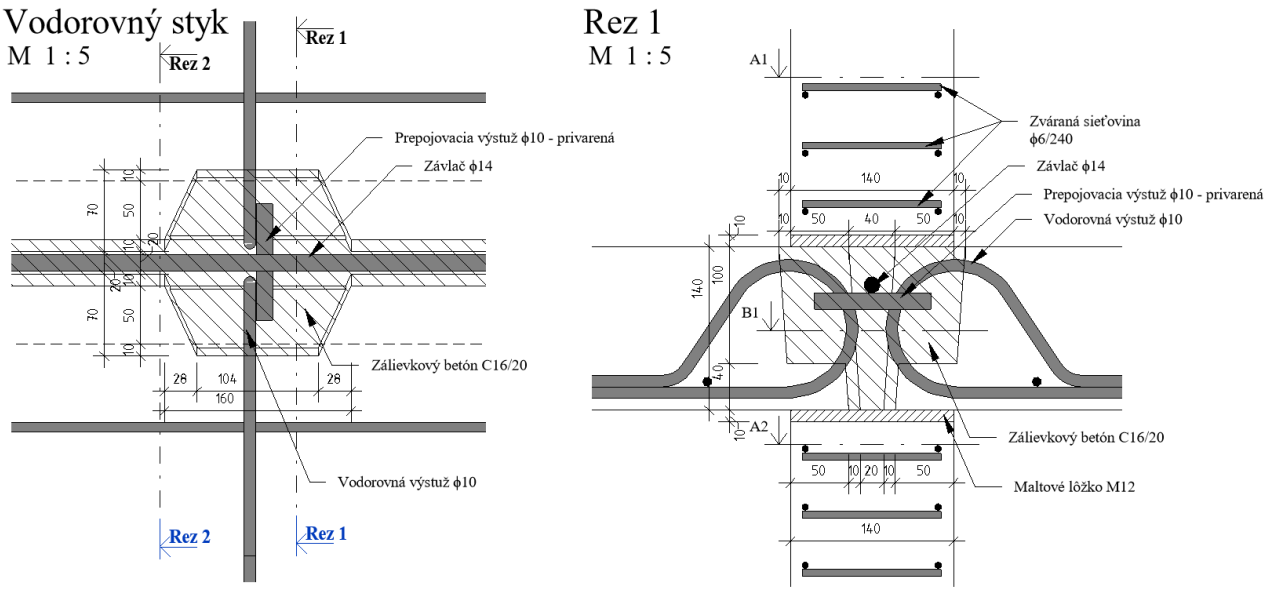
Na základe systematického zhromaždenia a kategorizácie porúch panelových bytových domov, ktoré boli odhalené počas rôznych stavebno-technických prieskumov a analýz odbornej literatúry (vrátane správ z Veľkej Británie [8], Poľska [3], [4], [5], [7], [9], [10], [11]; Estónska[12]; Kazachstanu [13] a Ruska [14]), boli identifikované tri hlavné kategórie nedostatkov: montážne a výrobné chyby, degradácia materiálov a dodatočné zásahy do konštrukcií.
Najčastejšie sa vyskytujúce poruchy patria do skupiny montážnych a výrobných chýb, ktoré sú často dôsledkom nedostatočnej kontroly výroby na stavbe a nedostatočnej kvalifikácie pracovníkov. Medzi tieto poruchy patria: chýbajúca výstuž v stykoch [3], [4], [8], [10]; nedostatočné kotevné a stykovacie dĺžky prútov [4]; kaverny a hniezda v betónovej zálievke styku [10], [8], [4], [14]; montážne odchýlky ako napríklad excentrické uloženie stenových panelov (v extrémnych prípadoch až 8 cm) [3], [15], [11]; nedostatočná úložná šírka stropných panelov [8], [15] alebo chýbajúce maltové lôžko v uložení prefabrikovaných dielcov [8]. Výrobné vady ďalej zahŕňajú nedodržané výrobné tolerancie dielcov spôsobujúce náklon stenových dielcov [10]; prípadne použitie nevhodných druhov ocele [10] v prvkoch vystavených vplyvu vonkajšieho prostredia.
Poruchy sú taktiež spôsobené degradáciou materiálov, najmä karbonatáciou betónu a koróziou výstuže Korózia sa najčastejšie objavuje v dôsledku prenikania vlhkosti do konštrukcie. Zdroje vlhkosti sú rôznorodé, či už ide o vnútorné priestory (kuchyne/kúpeľne [8]); alebo o prenikanie vody z vonkajšieho prostredia skrz netesnosti v obvodovom alebo strešnom plášti [10], [8], [12], [9]. Zvýšenú vlhkosť môžu spôsobiť aj havárie rôznych inštalácií, napríklad únik vody z vodovodných alebo kanalizačných inštalácií [15]. Korózia sa taktiež objavuje v prvkoch so zvýšeným obsahom chloridov [8] a v prvkoch s nedostatočným krytím výstuže [8], [3], [15].
Na záver, tretia kategória zahŕňa poruchy spôsobené nedbanlivými dodatočnými zásahmi do konštrukcie. Príkladom sú nové otvory v nosných stenách, ktoré zapríčiňujú vznik lokálnych trhlín v nadpražiach a rohoch otvorov [16], [15] alebo pridanie nových vrstiev podláh, ktoré môžu spôsobiť preťaženie a nadmerné deformácie stropných konštrukcií [17].

3. Analýza vplyvu typických porúch panelových bytových domov na únosnosť a tuhosť stykov

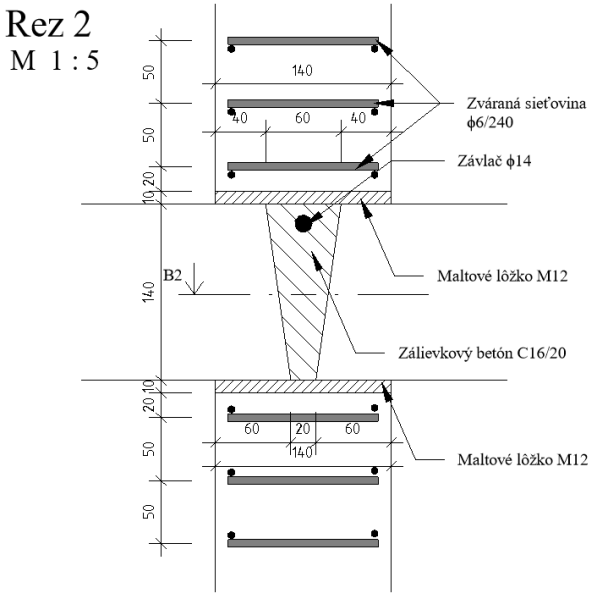
Predchádzajúca kapitola identifikovala a kategorizovala najčastejšie poruchy vyskytujúce sa v panelových bytových domoch. Cieľom tejto kapitoly je kvantifikovať vplyv týchto porúch na únosnosť a tuhosť kritických stykov panelového bytového domu konštrukčného systému T06B. Posúdenie stykov je realizované dvomi metodikami: analytickým výpočtom podľa normy STN 73 1211 [18] a nelineárnou numerickou analýzou metódou konečných prvkov (MKP). Analyzované sú dva hlavné typy stykov: zvislý styk (spoj stenových panelov) a vodorovný styk (spoj stenových a stropných panelov).
Na identifikáciu porúch s najvýraznejším negatívnym vplyvom na únosnosť a tuhosť posudzovaných konštrukčných stykov bola vytvorená parametrická štúdia, ktorá skúma vplyv nasledujúcich faktorov:

- Poruchy betónovej zálievky: Skúmané sú scenáre od klesajúcej triedy betónu (C16/20 až C5/6 pre vodorovný styk, C16/20 až C2/3 pre zvislý styk) až po úplnú absenciu zálievky (alebo jej častí v prípade zvislého styku).
- Montážne odchýlky: Aplikovaná excentricita uloženia horného stenového panelu vo vodorovnom styku (v rozsahu od 0 mm do 40 mm).
- Chýbajúca výstuž: Analyzuje sa absencia výstuže v zvislom styku.

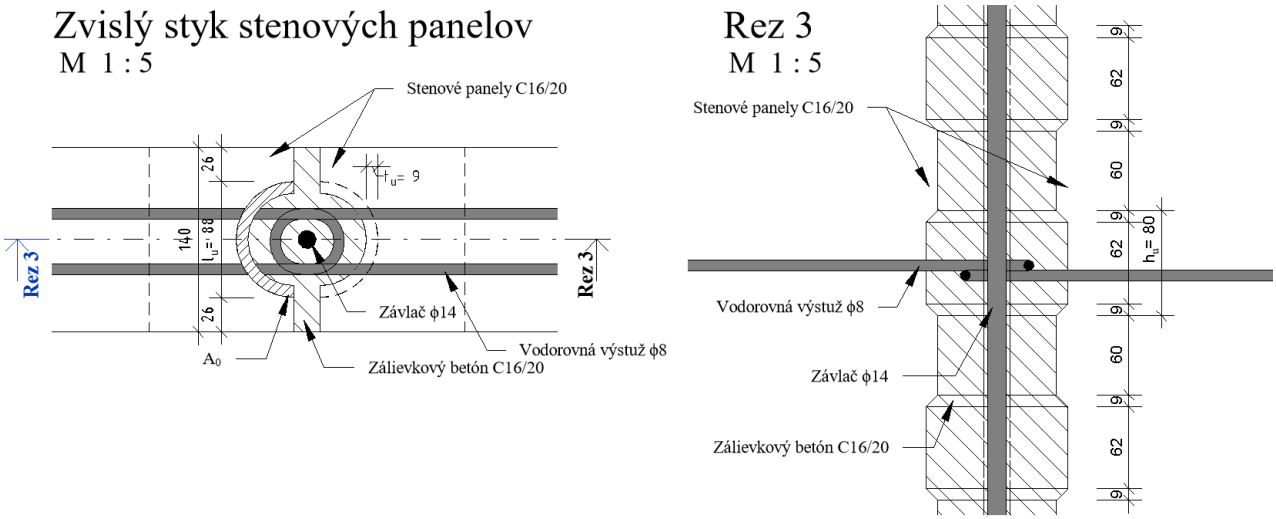
V závere kapitoly sú výsledky získané oboma metodikami porovnané.
Detaily stykov s uvažovanými parametrami, použitými pri výpočtoch, sú zobrazené na nasledujúcich obrázkoch (Obr. 1 až Obr. 4).



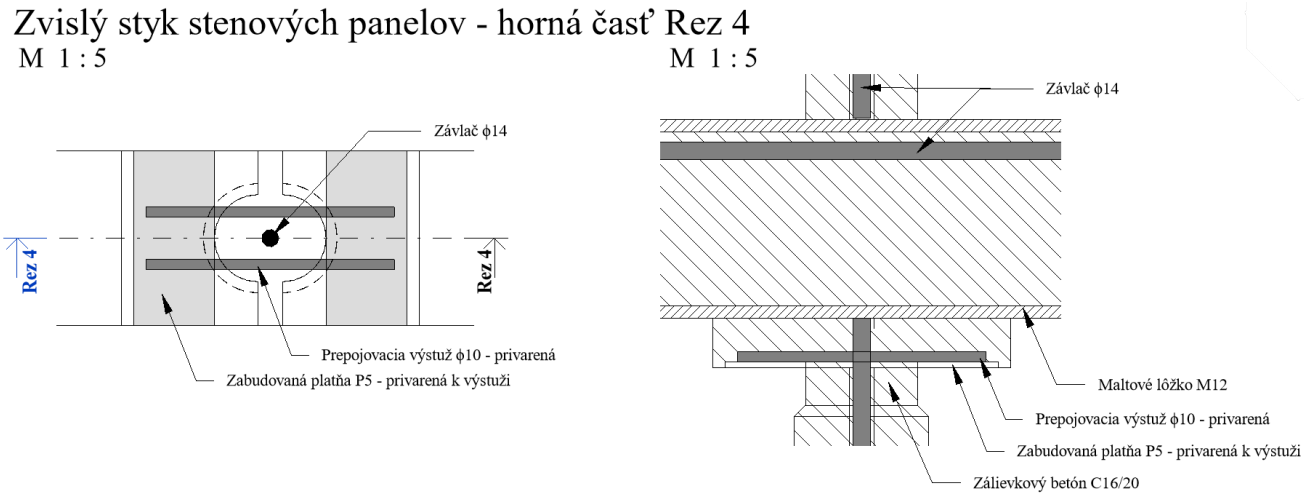
Obr. 1. Detail vodorovného styku – vľavo: pôdorys; vpravo: Rez A



Obr. 2. Detail vodorovného styku – Rez 2



Obr. 3. Detail zvislého styku – vľavo: Pôdorys; vpravo: Rez 3



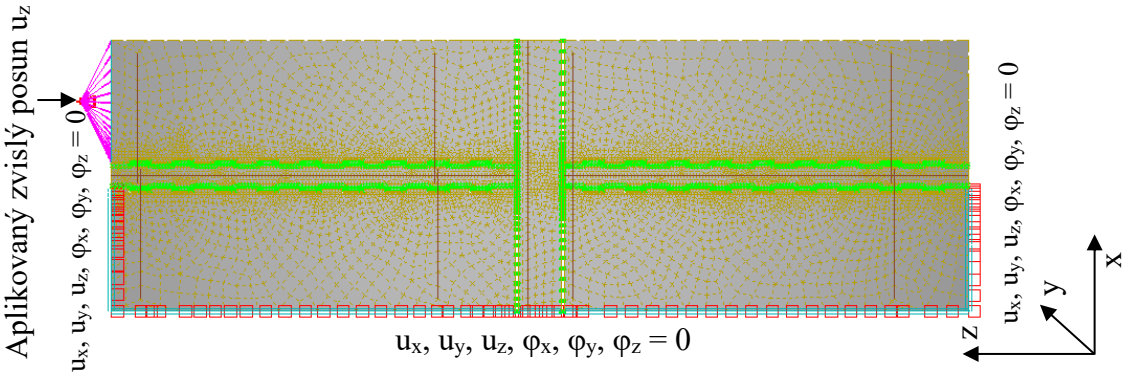
Obr. 4. Detail zvislého styku - horná časť stenového panela – vľavo: Pôdorys; vpravo: Rez 3

3.1 Metodika analytického výpočtu podľa STN 73 1211 [18]

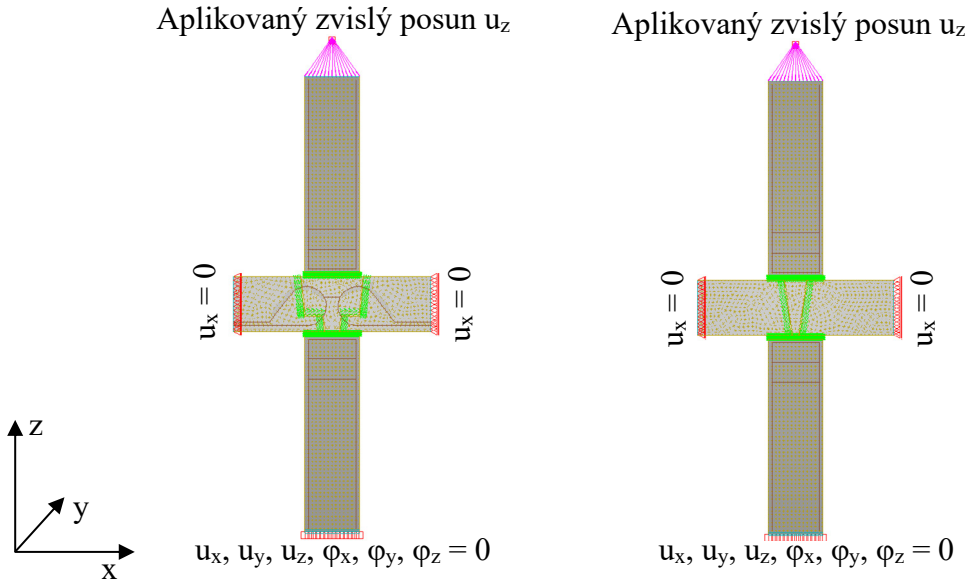
Analytické posúdenie stykov je vypracované podľa platnej STN 73 1211 [18] (ďalej uvádzané ako STN), revidovanej verzie pôvodnej ČSN 73 1211 (1983), ktorá bola zosúladená s princípmi Eurokódov a opiera sa o rozsiahly experimentálny program zo 60. – 80. rokov 20. storočia. Únosnosť vodorovného styku (Obr. 1 a Obr. 2) sa kontroluje v štyroch prierezoch (A1, A2, B1, B2). Vzorce zohľadňujú rôzne faktory ako sú montážne odchýlky, hrúbka maltového lôžka, príspevok vodorovnej výstuže a jej spojenia, ako aj množstvo výstuže v päte/hlave stenového panelu. Tuhosť vodorovného styku je definovaná redukciou efektívneho modulu pružnosti panelu.
Pri zvislom styku je šmyková únosnosť (V_{0Rd}) určená súčtom šmykovej odolnosti betónových častí (vrátane hmoždín a efektívnej šírky panelov) a príspevku vodorovnej výstuže a jej spojenia. Je dôležité poznamenať, že metodika výpočtu šmykovej odolnosti hmoždín sa odlišuje od Eurokódu 2 a je primárne závislá od geometrie styku. Celková šmyková tuhosť zvislého styku je následne definovaná súčtom šmykových tuhostí všetkých komponentov, ktoré prispievajú k jeho únosnosti.

3.2 Metodika numerického výpočtu

Vplyv porúch na správanie stykov panelových budov bol kvantifikovaný pomocou nelineárnej numerickej analýzy metódou konečných prvkov (MKP) v softvéri SOFiSTiK 2025. Styky sú v modeli reprezentované zjednodušenou geometriou, ktorá pozostáva z doskostenových prvkov (betónové dielce a zálievka s triedou C16/20) a prútových prvkov (betonárska výstuž). Kontakt medzi betónovou zálievkou a prefabrikovanými dielcami bol modelovaný tuhými pružinami s koeficientom trenia μ=0,75 a kohéziou c=0,2 MPa. Pre nelineárne výpočty bol použitý pracovný diagram SLS so strednými hodnotami pevnosti betónu. Výstuž bola modelovaná s medzou klzu f_{yk}=400 MPa a modulom pružnosti E=200 GPa.
Model bol zaťažený riadeným posunom v krokoch s veľkosťou 0,1 mm. Únosnosť (F_{Rd}) je definovaná maximálnou silou dosiahnutou počas nelineárnej step analýzy, zatiaľ čo tuhosť je určená sklonom dotyčnice ku krivke pracovného diagramu. Okrajové podmienky modelov sú zobrazené na Obr. 5 a Obr. 6.
Únosnosť vodorovného styku je vypočítaná na dĺžku 1 m styku. Pre výpočet boli použité dva modely, ktoré reprezentujú styk v Reze 1 a Reze 2 (pozri Obr. 1 a Obr. 2). Pre vodorovný styk bola zvolená veľkosť siete 10 mm s 50% zhustením siete v blízkosti hrán styku. Výsledná únosnosť N_{Rd} je stanovená ako sumácia maximálnych síl dosiahnutých v reprezentatívnych rezoch, konkrétne $N_{Rd}=N_{Rd,Rez1}+2.N_{Rd,Rez2}$.
Výpočtový model zvislého styku reprezentuje styk na výšku jedného podlažia 2,8 m. Táto výška bola rozdelená tak, že polovica výšky steny sa nachádzala pod vodorovným stykom a polovica nad ním. V mieste zálievky bola použitá veľkosť siete 10 mm s 50 % zhustením siete. Mimo oblasť spoja bola veľkosť siete postupne zväčšovaná až na konečnú hodnotu 100 mm.



Obr. 5. MKP model zvislého styku – zelená: kontaktné prvky, hnedá: prútové prvky, šedá: doskostenové prvky, červená: okrajové podmienky, ružová: tuhá väzba bodu a línie



Obr. 6. MKP modely vodorovného styku – vľavo: Rez 1; vpravo: Rez 2; zelená: kontaktné prvky, hnedá: prútové prvky, šedá: doskostenové prvky, červená: okrajové podmienky, ružová: tuhá väzba bodu a línie

3.3 Výsledky

Numerické modely konzistentne predpovedajú nižšiu medznú únosnosť pri bezchybných stykoch než STN 73 1211, čo je pravdepodobne spôsobené obmedzením MKP modelov na dvojosí stav napätosti. S klesajúcou únosnosťou v dôsledku porúch analytická metóda STN zvyšuje svoju konzervatívnosť. Najvýznamnejšie zníženie medznej únosnosti bolo zistené v situáciách reprezentujúcich závažné nedostatky v betónovej zálievke.

Pri numerickej analýze vodorovného styku sa ukázalo, že mechanizmus porušenia v priereze B2 začína plastizáciou elementov v spodnej časti betónovej zálievky, po ktorej nasleduje porušenie betónu stropnej dosky. Naopak, porušenie prierezu B1 je charakterizované priamym kolapsom betónovej zálievky styku.

Pokiaľ ide o vplyv montážnej excentricity: Pri malých excentricitách ($e \leq 10$ mm) predpovedá STN vyššiu únosnosť. Zatiaľ čo pri vyšších excentricitách ($e \geq 20$ mm) je únosnosť predpovedaná MKP vyššia, čo signalizuje nadmernú konzervatívnosť empirických súčiniteľov STN. Excentricita má pritom minimálny vplyv na počiatočnú tuhosť. Norma STN predpovedá porušenie styku v priereze B pre všetky excentricity, avšak v numerickom modeli porušenie nastáva v priereze A2 (horná časť spodného stenového panelu).

Pokiaľ ide o kvalitu zálievky, STN predpovedá vyššiu únosnosť pre vyššie triedy betónu (C16/20 až C12/15). Naopak, MKP dosahuje vyššie únosnosti v rozsahu nižších tried (≤C8/10). Toto zistenie zdôrazňuje trend rýchlejšie klesajúcej únosnosti podľa metodiky STN v dôsledku výskytu porúch. Absencia zálievky spôsobuje najvýraznejší pokles medznej sily a tuhosti.

V prípade zvislého styku je kolaps v MKP iniciovaný tvorbou trhlín v blízkosti vodorovnej výstuže, po ktorom nasleduje drvenie betónu na šikmých plochách šmykových hmoždín. Následne dochádza k rozdrveniu tlakovej diagonály betónu vo venci (horizontálny styk). Podobne ako pri vodorovnom styku, STN predpovedá vyššie únosnosti pri vyšších triedach betónu (styky nevykazujúce poruchy), zatiaľ čo MKP predikuje vyššie únosnosti v nižších pevnostných triedach. Zároveň STN vykazuje vyššiu mieru poklesu únosnosti ako MKP. Rôzne triedy betónu zanedbateľne ovplyvňujú počiatočnú tuhosť. Vplyv dutín v zálievke (znižovanie počtu funkčných šmykových hmoždín n) znižuje šmykovú odolnosť proporcionálne. Hoci STN predpovedá vyššiu celkovú odolnosť, vykazuje vyššiu mieru poklesu únosnosti než MKP. Okrem toho, počiatočná tuhosť progresívne

klesá. Pri poruchách vodorovnej výstuže (napr. chýbajúca závlač, chýbajúci zvar) analytický vzorec STN eliminuje celý príspevok výstuže (41,28 kN), zatiaľ čo MKP predikuje rôzne únosnosti pre špecifické poruchy výstuže, pričom počiatočná tuhosť zostáva takmer totožná.

4. Použitie nedeštruktívnych metód k identifikácií a kvantifikácií porúch panelových bytových domov

Súčasný vývoj nedeštruktívnych (ND) metód a prístrojov umožňuje čoraz širšie a efektívnejšie využitie týchto techník v diagnostike existujúcich stavebných konštrukcií. Publikácie [10], [19], [7], [11] opisujú využitie rôznych deštruktívnych a ND metód pre diagnostiku stavu panelových budov. Pre zisťovanie kvality betónu a identifikáciu chýb stykov boli využité ultrazvukové metódy:

- Ultrasonic Pulse Velocity (UPV): Bola použitá na určovanie kvality betónu (pevnosť v tlaku, homogenita) na základe rýchlosti šírenia ultrazvukových vĺn medzi dvoma bodmi.
- Ultrasonic Pulse Echo (UPE): Bola využitá na určovanie kvality betónu v zvislých stykoch, hĺbky trhlín a meranie hrúbky konštrukcie prístupnej len z jednej strany. Metóda využíva princíp odrazu vlny na rozhraní dvoch materiálov, pričom rovnako ako UPE meria rýchlosť šírenia ultrazvukových vĺn v materiály.
- Metóda Ultrasonic hardness tests (UCI): Bola použitá na určovanie pevnosti oceľových prvkov, metóda si vyžaduje čiastočne odkrytie oceľových spojov.

Okrem ultrazvukových metód bola na určovanie kvality betónu (homogenita a pevnosť v tlaku) využitá aj odrazová metóda prostredníctvom Schmidtovho kladivka. Pre zisťovanie polohy, priemeru a hrúbky krytia výstuže bol použitý elektromagnetický indikátor výstuže. Pre zisťovanie obsahu chloridov v betóne a mieru korózie výstuže bol zmeraný elektrický odpor konštrukcie Wennerovou metódou.
V ďalšej publikácií [11] autor využíva laserové skenovanie na analýzu geometrie, identifikáciu montážnych defektov a meranie deformácií konštrukcie.

4.1 Inovatívne využitia ND metód k identifikácií a kvantifikácií porúch panelových bytových domov

Táto kapitola zhodnocuje potenciál existujúcich a inovatívnych ND metód pre diagnostiku porúch v panelových konštrukciách a ich stykoch, vrátane hypotetických aplikácií.
Na globálne posúdenie stavu a identifikáciu porúch by bolo možné použiť Operatívnu Modálnu Analýzu (OMA), ktorá meraním zrýchlení alebo posuvov v čase získava vlastné frekvencie a vlastné tvary konštrukcie. Metóda je primárne vhodná na dlhodobé monitorovanie zmien dynamických charakteristík. Presná lokalizácia poškodenia je však komplikovaná kvôli citlivosti na ruchy okolitého prostredia a kvôli požiadavke na rozsiahlu sieť snímačov [20].
Pre rýchlu identifikáciu porúch v zálievke by sa mohla použiť Infrared Thermography (IRT), ktorá meria povrchové rozdiely v tepelnom žiarení. Využitím aktívneho zahrievania by bolo možné jednoducho identifikovať vzduchové dutiny a nevyplnené styky. Výhodou IRT je rýchle snímanie veľkých plôch, nevýhodou je obmedzená hĺbka penetrácie a citlivosť na vonkajšie vplyvy [21], [22].
Metóda UPV by mohla byť aplikovaná na zisťovanie dutín a homogenity zálievky nepriamou metódou vo vodorovných a zvislých stykoch na seba kolmých stien. Je však pomerne pracná a podobne ako UPE citlivá na diskontinuity[23]. Rezonančné metódy (Impact Echo, Impulse Response) slúžia na určenie hrúbky a lokalizáciu dutín. Pomocou nich by bolo pravdepodobne možné odhaliť kaverny vo vodorovných a zvislých stykoch [24].
Ground-penetrating radar (GPR) vysiela elektromagnetické impulzy a bol by vhodný na lokalizáciu zálievkovej výstuže a dutín v betóne. Metódu je možné použiť aj pod uhlom [25] na diagnostiku

vodorovného a zvislého styku kolmých stien. Metóda je rýchla, ale citlivá na iné kovové prvky (el. káble, lišty. Radiometrické metódy (röntgenové/gama žiarenie) síce by poskytli podrobný prehľad o vadách, ale kvôli radiačnej bezpečnosti je ich použitie v obytných budovách neprijateľné.

5. Záver

Táto štúdia analyzovala výskyt a typy porúch v nosných stykoch panelových bytových domov. Primárnym cieľom práce bola kvantifikácia vplyvu týchto porúch na únosnosť a tuhosť stykov pomocou analytickej metódy STN 73 1211 a nelineárnej numerickej analýzy. Zároveň preskúmala možnosti ND metód na efektívnu identifikáciu a kvantifikáciu najkritickejších porúch.
Numerické modely konzistentne predpovedali nižšiu medznú únosnosť pri bezchybných stykoch než STN. S klesajúcou únosnosťou sa však analytická metóda STN stávala konzervatívnejšou. Analýza preukázala, že najvýznamnejší negatívny vplyv na únosnosť a tuhosť stykov mali poruchy betónovej zálievky (vrátane výrazného zníženia kvality, dutín alebo úplnej absencie) a montážne odchýlky.
V kontexte diagnostiky má pre rýchlu identifikáciu dutín v zálievke najväčší potenciál metóda IRT. Pre podrobnejšiu analýzu kvality betónu je vhodné využiť ultrazvukové metódy, najmä UPE a UPV. GPR môže slúžiť na lokalizáciu zálievkovej výstuže, ktorá má kľúčový význam pre robustnosť konštrukcie. Budúci výskum by sa mal taktiež zamerať na použitie rezonančných metód a analýzu zmeny modálnych vlastností vplyvom porúch.

Použitá literatúra

[1] M. Wardach and J. R. Krentowski, “Current perspective on large-panel buildings – A review,” Dec. 01, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.istruc.2023.105537.
[2] P. Knyziak, “Failure mechanisms of prefabricated multi-family buildings under gas explosions,” *Eng Fail Anal*, vol. 174, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.engfailanal.2025.109548.
[3] P. Knyziak, “The quality and reliability in the structural design, production, execution and maintenance of the precast residential buildings in Poland in the past and now,” 2016, *Trans Tech Publications Ltd*. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.691.420.
[4] J. Szulc and A. Piekarczuk, “Diagnostics and technical condition assessment of large-panel residential buildings in Poland,” *Journal of Building Engineering*, vol. 50, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2022.104144.
[5] W. Górski, “Problems of early large panel structures in Poland,” *ACTA SCIENTIARUM POLONORUM - Architectura Budownictwo*, vol. 20, no. 3, pp. 45–53, Dec. 2021, doi: 10.22630/aspa.2021.20.3.25.
[6] Stuart. Matthews and B. . Reeves, *Handbook for the structural assessment of large panel system (LPS) dwelling blocks for accidental loading*. IHS BRE Press, 2012.
[7] M. Wardach and J. R. Krentowski, “Diagnostics of Large-Panel Buildings—An Attempt to Reduce the Number of Destructive Tests,” *Materials*, vol. 17, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/ma17010018.
[8] R. , J. Currie, B. , R. Reeves, and J. , F. , A. Moore, “BR107 Part 1 The Structural Adequacy and Durability of Large Panel System Dwellings,” 1987.
[9] P. Knyziak and M. Kanoniczak, “Difficulties in Operation of Elevations in Large-Panel Buildings,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Nov. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/661/1/012059.
[10] M. Wardach, “Assessment of the degradation state of joints in large-panel buildings,” *Eng Fail Anal*, vol. 145, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.107020.

[11] M. Wardach, J. A. Pawłowicz, M. Kosior-Kazberuk, and J. R. Krentowski, "The Diagnostics of the Condition and Management of Large-Panel Buildings Using Point Clouds and Building Information Modelling (BIM)," *Buildings*, vol. 13, no. 8, Aug. 2023, doi: 10.3390/buildings13082089.
[12] T. Kalamees *et al.*, "Technical Condition of Prefabricated Concrete Large Panel Apartment Buildings in Estonia," 2011.
[13] K. Girus, "Evaluation of the condition of the external layer of walls in the national technological system 'S-Sz' (Szczecin System) of large-panel prefabricated construction", doi: 10.1051/matecconf/201928.
[14] Z. K. Abaev and A. D. Valiev, "Nonlinear dynamic analysis of reinforced concrete large-panel building," *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 30–42, Jun. 2025, doi: 10.22337/2587-9618-2025-21-2-30-42.
[15] P. Knyziak, "The impact of construction quality on the safety of prefabricated multi-family dwellings," *Eng Fail Anal*, vol. 100, pp. 37–48, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.02.042.
[16] Y. Aldakhov, V. Lapin, Z. Moldamuratov, and S. Aldakhov, "Statistical Estimation of Reliability Values for Large-Panel Buildings Based on Passportization Results," *Civil Engineering Journal (Iran)*, vol. 11, no. 5, pp. 2066–2083, May 2025, doi: 10.28991/CEJ-2025-011-05-019.
[17] M. Mackiewicz, J. R. Krentowski, P. Knyziak, and M. Wardach, "Consequences of excessive deformation of structural elements in precast buildings," *Eng Fail Anal*, vol. 137, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106261.
[18] "STN 73 1211 Posudzovanie betónových konštrukcií existujúcich panelových budov [Assessment of concrete structures of existing large panel buildings]," 2011.
[19] M. Wardach, J. R. Krentowski, and P. Knyziak, "Degradation Analyses of Systemic Large-Panel Buildings Using Comparative Testing during Demolition," *Materials*, vol. 15, no. 11, Jun. 2022, doi: 10.3390/ma15113770.
[20] F. Frigui, J. P. Faye, C. Martin, O. Dalverny, F. Peres, and S. Judenherc, "Global methodology for damage detection and localization in civil engineering structures," *Eng Struct*, vol. 171, pp. 686–695, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.06.026.
[21] G. F. Sirca and H. Adeli, "Infrared thermography for detecting defects in concrete structures," 2018, *Vilnius Gediminas Technical University*. doi: 10.3846/jcem.2018.6186.
[22] V. Patrikar, G. Malathi, M. H. Santhi, and H. Bilgin, "Thermal imaging for void detection and quantification in precast grouted structures using computer vision," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 114, pp. 608–620, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.aej.2024.11.080.
[23] A. Ndagi, A. A. Umar, F. Hejazi, and M. S. Jaafar, "Non-destructive assessment of concrete deterioration by ultrasonic pulse velocity: A review," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Nov. 2019. doi: 10.1088/1755-1315/357/1/012015.
[24] Y. L. Liu, J. J. Shi, J. Q. Huang, G. S. Wei, and Z. X. Wu, "Grouting Defect Detection of Lapped Bar Connections Based on Impact-Echo Method," *Shock and Vibration*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/1934240.
[25] J. B. Elliott, D. Chaney, and H. Murtaza, "Angled ground penetrating radar to detect and position reinforcement and bearing lengths within reinforced autoclaved aerated concrete planks," *Constr Build Mater*, vol. 449, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138528.

***Karolína Mazáčková*[1]**
Študijný program: D-TKeIS4, ročník: 2.

NÁVRH UMIESTNENIA MERACÍCH SENZOROV PRE ONLINE MONITOROVANIE MOSTU ILAVA

SENSOR LOCATION DESIGN FOR ONLINE MONITORING OF THE ILAVA BRIDGE

Abstract
This paper presents the design and implementation of an online monitoring system for a newly constructed steel arch bridge in Ilava, developed within the APVV-22-0431 research project. The system integrates continuous monitoring of fundamental parameters (stress, temperature, traffic video recording) with periodic diagnostic campaigns employing advanced techniques such as radar interferometry and accelerometry. A key aspect of the design was the optimal placement of strain gauges, determined through numerical simulations and evaluation of the Relative Stress Increment (RSI). By comparing two loading scenarios (LC1 and LC2), the analysis revealed minimal differences in RSI values between sensor locations SG1 and SG16. Although the mid-span location (SG16) typically experiences higher stress levels, the practical advantages of SG1—such as easier installation, maintenance access, shorter cabling, and internal visual inspection—make it the preferred choice for permanent monitoring. The proposed solution offers a balanced approach between measurement accuracy and technical feasibility, providing a reliable foundation for long-term structural health monitoring and bridge management.

Kľúčové slová / Key Words
Digitálne dvojča; online monitorovanie; diagnostika stavebných konštrukcií; dynamický test

1. Úvod

Spolu s riešiteľským kolektívom projektu APVV (J. Brodniansky, T. Klas, M. Sokol, M. Venglár, K. Mazáčková) sme publikovali článok „Design of Online Monitoring System on Arch Bridge“ na konferencii ICNAAM [1]. V príspevku bol predstavený návrh a realizácia online monitorovacieho systému pre nový oceľový oblúkový most v Ilave. V nasledujúcom texte stručne zhrniem hlavné časti publikovaného článku a detailnejšie sa zameriam na problematiku umiestnenia meracích senzorov, ktorá tvorí kľúčovú časť práce.

2. Popis mostnej konštrukcie

Most v Ilave je novovybudovaný oceľový oblúkový most s hlavným rozpätím 48.8 m a výškou oblúka 8 m. Celková šírka mosta je 15.93 m, z toho 9.9 m tvorí vozovka a zvyšok sú chodníky po oboch stranách. Mostovka je spojitá železobetónová doska, zavesená na oceľový oblúk pomocou zvislých závesov. V centrálnej časti sú závesy rozmiestnené po 6 m, na krajných segmentoch po 9.4 m (Fig. 1. a 2. podľa [1]). Pre účely analýzy bol vytvorený numerický FEM model mosta (Fig. 1. b) podľa [1]), ktorý slúžil ako digitálne dvojča konštrukcie.

[1] Karolína Mazáčková, Ing., karolina.mazackova@stuba.sk

3. Koncepcia monitorovacieho systému

Cieľom bolo navrhnúť systém, ktorý umožní dlhodobé online monitorovanie mosta a zároveň realizovať periodické meracie kampane pre detailnejšiu diagnostiku. Rozlišujú sa teda dve fázy:

- Permanentné online monitorovanie (POM) – priebežné meranie základných veličín (napätie, teplota, videozáznam dopravy) s okamžitým spracovaním dát v riadiacom počítači (Fig. 3. podľa [1]). Dáta sa následne prenášajú do cloudového úložiska a vyhodnocujú pomocou porovnania medzi nameranými a numericky predpovedanými hodnotami [2].
- Polročná / ročná sofistikovaná monitorovacia kampaň (SMC) – rozšírené merania pomocou dodatočných tenzometrov , akcelerometrov a radarovej interferometrie [3]. Cieľom tejto fázy je identifikovať vlastné tvary a frekvencie mosta a kalibrovať permanentný systém POM (Fig. 4. a 5. podľa [1]). Koncept kombinovaného monitorovania pomocou permanentných a doplnkových senzorov bol úspešne implementovaný aj v práci Cui a kol. [4]. Hybridné merania, ktoré kombinujú údaje zo strain gauge, akcelerometrov, DFOS a radarových systémov, sa ukazujú ako mimoriadne užitočné pri optimalizácii senzorového pokrytia a presnosti diagnostiky, ako uvádzajú Tang a kol. [5].

4. Kľúčové ukazovatele KPI

Na vyhodnotenie presnosti a spoľahlivosti merania sa zaviedol ukazovateľ KPI (Key Performance Indicator), ktoré počítame podľa vzorca:

$$KPI_{SGi}(t) = \frac{\sigma_{ni}(t)}{\sigma_{ti}(t)} \tag{1}$$

kde $\sigma_{ni}(t)$ je napätie vypočítané numericky pomocou vplyvových čiar a $\sigma_{ti}(t)$ je napätie namerané tenzometrami.
Na základe týchto hodnôt sa vyhodnocujú štatistické parametre (priemer, smerodajná odchýlka a variačný koeficient), ktoré umožňujú priebežné sledovanie technického stavu konštrukcie. Metódy odhadu napätí z tenzometrických údajov, ktoré sú základom výpočtu KPI, boli úspešne aplikované aj pri analýze predpätých mostov [6].

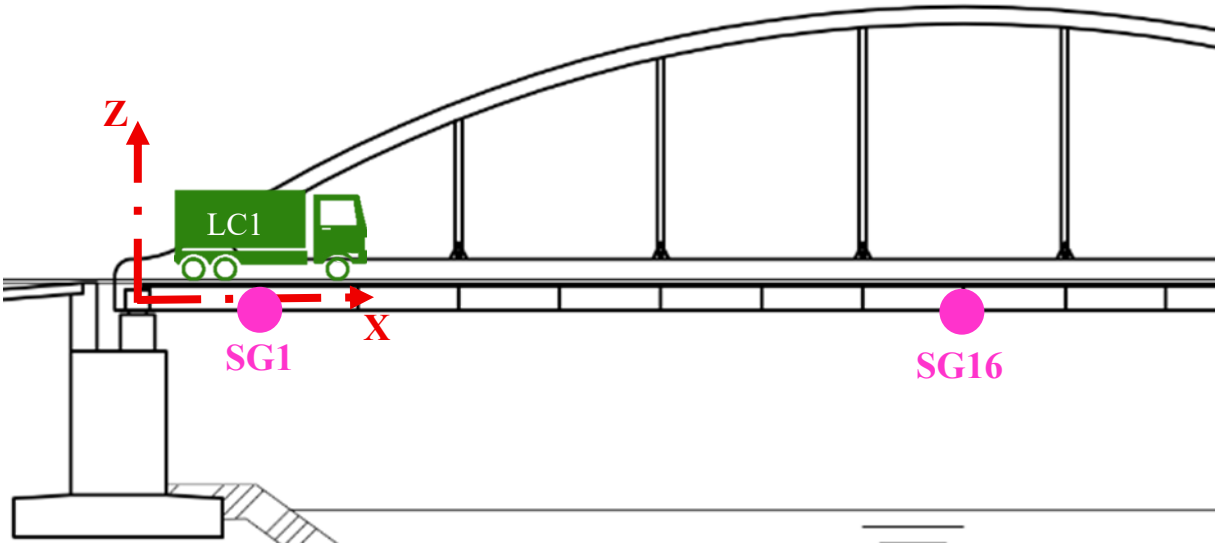
5. Návrh umiestnenia senzorov

Základnou otázkou návrhu bolo, kde najefektívnejšie merať napätia na moste, aby bolo možné zachytiť najcitlivejšie miesta z hľadiska prevádzkového zaťaženia. Pre tento účel sa definovala hodnota relatívneho prírastku napätia RSI (Relative Stress Increment) podľa vzťahu:

$$RSI_{SGi}(t) = \frac{\Delta\sigma_{d+t}(t)}{\sigma_{SGS}(t)} \tag{2}$$

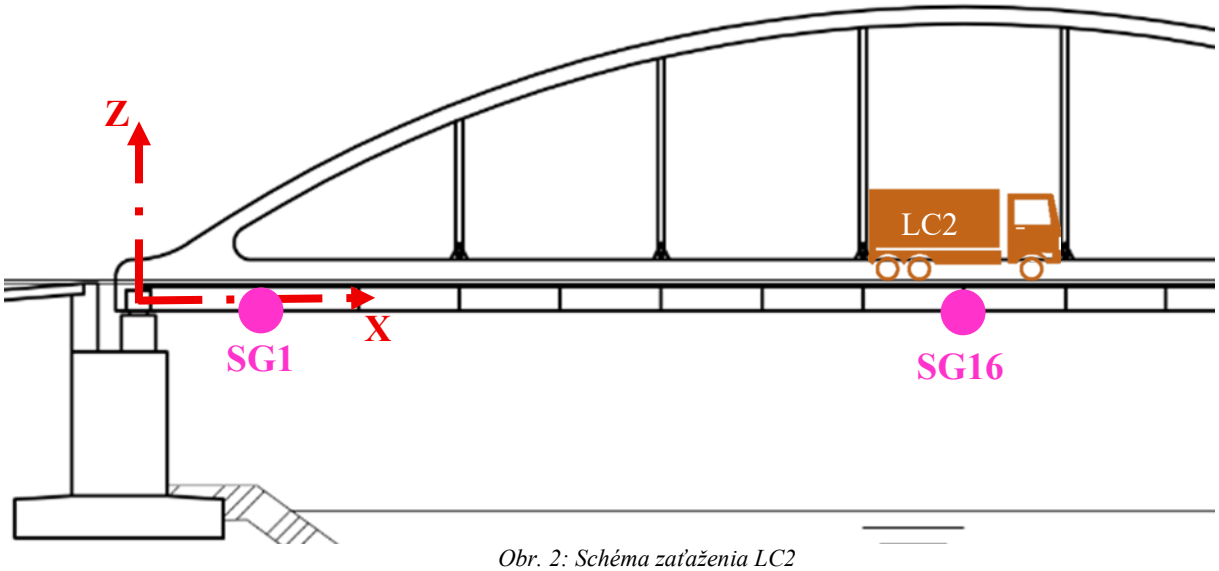
kde $\Delta\sigma_{d+t}(t)$ je prírastok napätia spôsobený dopravným zaťažením bez zahrnutia vlastnej tiaže konštrukcie a $\sigma_{SGS}(t) = 0.34\ MPa$ je citlivosť tenzometra.
Približnú koncepciu návrhu podľa prírastku pomerného pretvorenia využívajú Zhou a kol. [7], ktorí odvádzajú analytické vzťahy pre dlhé tenzometrické senzory a používajú ich pri návrhu optimálneho umiestnenia senzorov (OSP).
Platí, že čím vyššia je hodnota RSI, tým vhodnejšie je dané miesto pre umiestnenie senzora.

Predpokladajme zaťažovací stav LC1 ako nákladné vozidlo s hmotnosťou 40 t (*Obr. 1*). Ak vozidlo umiestnime na začiatok mosta, priamo nad predpokladanú polohu tenzometra SG1 (strain gauge 1), môžeme vypočítať prírastok napätia v miestach SG1 a SG16 (naznačené na *Obr. 1*).



Obr. 1: Schéma zaťaženia LC1

Druhý zaťažovací stav, LC2, predstavuje rovnaké nákladné vozidlo, tentoraz umiestnené v strede rozpätia mosta, teda nad predpokladanou polohou tenzometra SG16 (strain gauge 16, *Obr. 2*). Aj v tomto prípade sa vypočítava prírastok napätia v bodoch SG1 a SG16, aby sa posúdila vzájomná odozva týchto dvoch meracích miest na zmenu polohy zaťaženia.
Analytické formulácie pre prírastky vplyvových čiar pomerných pretvorení a ich zmenu v závislosti od polohy zaťaženia sú detailne rozobraté v [8], kde autori aplikovali metódu na T-nosníkové mosty.



Obr. 2: Schéma zaťaženia LC2

Po vypočítaní všetkých prírastkov napätí sa dá určiť hodnota RSI pre miesta SG1 a SG16. (Fig. 6. podľa [1]). Na prvý pohľad sa môže zdať, že poloha SG16 v strede rozpätia je vhodnejšia pre trvalé monitorovanie, keďže práve tam sa spravidla prejavujú najvyššie priehyby a s nimi súvisiace napätia. Hodnoty RSI pre oba senzory sú však veľmi podobné, a preto je z praktického hľadiska výhodnejšie umiestniť permanentný senzor na začiatok mosta – do polohy SG1. Táto lokalita umožňuje

jednoduchšiu inštaláciu, lepší prístup pri údržbe, kratšie napájacie káble a zároveň vizuálnu kontrolu senzora z vnútorného priestoru mosta.

6. Záver

V príspevku bol opísaný publikovaný článok, ktorý opisuje návrh online monitorovacieho systému pre oceľový oblúkový most v Ilave. Kombinuje trvalé meranie základných veličín s rozšírenými diagnostickými kampaňami. Kľúčovou časťou práce bol návrh optimálneho umiestnenia meracích senzorov. Bol realizovaný na základe numerických analýz a vyhodnotenia relatívneho prírastku napätia (RSI). Analýza ukázala, že aj keď sa miesta s najvyššími napätiami nachádzajú v strede rozpätia, rozdiel medzi lokalitami SG1 a SG16 je z hľadiska citlivosti minimálny. Preto bolo z praktických dôvodov zvolené umiestnenie senzorov v oblasti SG1. Navrhnuté riešenie predstavuje efektívny kompromis medzi presnosťou merania a technickou realizovateľnosťou, čím sa vytvára spoľahlivý základ pre dlhodobé online monitorovanie a správu mostnej konštrukcie.

Poďakovanie

Táto práca bola podporená grantom APVV-22-0431, poskytnutým Agentúrou na podporu výskumu a vývoja Slovenskej republiky.

Literatúra

[1] BRODNIANSKY, J., KLAS, T., SOKOL, M., MAZÁČKOVÁ, K., VENGLÁR, M.: Design of Online Monitoring System on Arch Bridge. Príspevok prezentovaný na konferencii ICNAAM 2025 – International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics. Rhodos, Grécko, 15.–21. september 2025. Nepublikovaný rukopis. Slovenská technická univerzita v Bratislave.

[2] OLASZEK, P., ŁAGODA, M., CASAS, J.R.: Diagnostic load testing and assessment of existing bridges: examples of application. Structural and Infrastructure Engineering. 2013, roč. 10, č. 6, s. 834–842. ISSN 1573-2479. [online]. Dostupné na: https://doi.org/10.1080/15732479.2013.772212 [cit. 20.10.2025].

[3] GARA, F., NICOLETTI, V., ROIA, D., DALL'ASTA, A.: Experimental modal properties of a steel arch bridge during the static load test. In: CONTE, J., ASTROZA, R., BENZONI, G., FELTRIN, G., LOH, K., MOAVENI, B. (eds.) Experimental Vibration Analysis for Civil Structures. EVACES 2017. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 5. Cham : Springer, 2018, s. 511–518. ISBN 978-3-319-67442-1. [online]. Dostupné na: https://doi.org/10.1007/978-3-319-67443-8_64 [cit. 20.10.2025].

[4] CUI, J., ZHANG, Y., LIU, H., WANG, J., ZHOU, Y.: Design and Implementation of a Bridge Health Monitoring System Based on Multi-Source Sensing. Buildings. 2025, roč. 15, č. 18, článok 3308. ISSN 2075-5309. [online]. Dostupné na: https://www.mdpi.com/2075-5309/15/18/3308 [cit. 25.10.2025].

[5] T ANG, K., XU, S., YANG, Y., KONG, H., MA, Y.: Optimal Sensor Placement Using Combinations of Hybrid Measurements for Source Localization. IEEE Radar Conference (RadarConf). 2024. [online]. Dostupné na: https://arxiv.org/abs/2504.03769 [cit. 25.10.2025].

[6] KHAYAM, S.U., ZHANG, Y., ZHOU, Y., WANG, J., LIU, H.: Tendon stress estimation from strain data of a bridge. Sensors. 2023, roč. 23, č. 11, článok 5040. ISSN 1424-8220. [online]. Dostupné na: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/11/5040 [cit. 25.10.2025].
[7] ZHOU, Z., ZHANG, H., YANG, C., LI, Y., WANG, B.: Optimal sensor placement of the artificial lateral line based on the strain-influence function. Sensors and Actuators A: Physical. Vol. 370, 2024, s. 114219. ISSN 0924-4247. [online]. Dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114219 [cit. 25.10.2025].
[8] DENG, N., ZHANG, Y., LIU, H., WANG, J., ZHOU, Y.: Rapid damage diagnosis for T-beam bridges using strain influence lines. Scientific Reports. 2025, roč. 15, článok č. 7233. ISSN 2045-2322. [online]. Dostupné na: https://www.nature.com/articles/s41598-025-07233-w [cit. 25.10.2025].

Muhammad Mohsin[1]
Study program: Theory and Structures of Civil Engineering Works, 2nd year

VPLYV BIOPOLYMÉRU NA ADSORPČNÉ VLASTNOSTI BENTONITU

INFLUENCE OF BIOPOLYMER ON BENTONITE ADSORPTION PROPERTIES

Abstract
The diversity of soil types in natural landscapes has different geotechnical characteristics. A primary challenge in this domain is to start by analyzing these fundamental properties. This paper is part of a broader study that examines how different soils from different localities interact with water. During the initial phase of the research, the adsorption characteristics of bentonite clay were experimentally evaluated, both with and without the presence of a biopolymer. It was noted that bentonite clay, recognized for its significant swelling capacity and water sensitivity, initially adsorbs a considerable volume of water, although this adsorption diminishes over time. Additionally, the incorporation of different amounts of biopolymer into the bentonite revealed a behavior pattern that was not the same as that of the untreated soil. Based on the experimental findings, the need for additional experimental studies is suggested by altering the influencing factors.

Keywords
Sustainable usage, carbon footprints, biopolymer, bentonite, swelling, adsorption.

1. Introduction

As global infrastructure development gains momentum, there is an increasing imperative for sustainable geotechnical solutions. In geotechnical engineering, inadequate soil stabilization poses a number of difficulties that impact the longevity and functionality of structures. For example, expansive soils cause problems like swelling and shrinkage, which can result in structural instability and cracking [1]. Inadequate stabilization of these types of soils can lead to increased permeability and poor load-bearing capacity, both of which are harmful to structural integrity [2]. Bentonite is a type of clay that is often used in geotechnical engineering for things like landfill liners or soil stabilization. This is because it has some special properties, such as being very permeable and very expansive. However, using it can be hard for geotechnical reasons. Bentonite is useful for controlling soil properties in geotechnical applications, but it must be used with care to avoid problems like too much swelling and changes in soil structure that can make things unstable. Research indicates that combinations of bentonite with other substances, such as Ottawa sand and Class C fly ash, can markedly diminish the soil's swelling characteristics. These mixes make bentonite clay less expansive and less likely to inflate, which makes the soil more stable [3].

In the context of compacted clay landfill barriers, the addition of bentonite can influence several geotechnical properties. It tends to increase the liquid limit, plastic limit, and plasticity index of the clay. This increased plasticity can enhance the soil's ability to absorb and retain water, but it can also lead to increased swelling and shrinkage potential. While the addition of bentonite reduces hydraulic conductivity, improving the barrier's effectiveness against fluid migration, it can also affect the mechanical stability due to increased swelling potential [4]. When used in engineered barriers for pollution containment, bentonite plays a crucial role in adsorption processes. Its interaction with

contaminants, such as heavy metals, can be influenced by factors like ionic strength and bentonite content. While bentonite improves the adsorption capacity, excessive amounts can disrupt the soil microstructure, compromising the containment system's integrity for pollutants like chromium [5].

2. Environmental Concerns and Need of Sustainable Material

Lime production is a major source of CO2 emissions, primarily due to the calcination process where limestone (CaCO3) is heated to produce lime (CaO). The production of lime emits approximately 0.77 to 0.75 tonnes of CO2 per tonne of lime produced. This includes both process emissions from the decomposition of limestone and emissions from fossil fuel combustion used for heating the kilns. About two-thirds of the CO2 emissions come from the calcination of limestone itself. At the same time, the remaining one-third is associated with the combustion of fossil fuels used in the production process [6].

Cement production is one of the largest industrial sources of CO2 emissions. The cement industry generates approximately 3 billion tonnes of CO2 annually, accounting for about 8% of total anthropogenic CO2 emissions [7]. This includes both process emissions (from the calcination of limestone) and energy-related emissions. The average emission factor for cement production is estimated to be around 0.5 to 0.6 tonnes of CO2 per tonne of cement produced. This figure can vary based on the specific processes and technologies used [8].

3. Biopolymers in Soil

This section covers the behavior and role of biopolymers in soils.

3.1 Biopolymer soil interaction

Naturally sourced biopolymers are a promising low carbon ‘green’ substitute, achieving higher strength in stabilized soils than cement at similar cost. The way biopolymers interact with soil particles is key to improving soil strength. SEM analysis helps study this process [9].

Biopolymers enhance soil strength through distinct mechanisms depending on soil type. Figure 1 is one of the best illustrations of biopolymer soil interaction with different soil types. In sandy soils (a), the biopolymer solution coats particles and, upon curing, forms strong, short-chain bridges that draw particles closer, reducing pore space and increasing shear strength. In clayey soils, the interaction is governed by the clay's mineralogy and charge. Kaolinite (b), with its stable, hydrogen-bonded structure and low cation exchange capacity (CEC), has a lower tendency to absorb biopolymers. In contrast, montmorillonite's (c) high CEC, large surface area, and weak van der Waals bonds make it more receptive to biopolymer absorption, which helps reduce its swelling potential and form new cementitious compounds [10].

3.2 Effect on geotechnical properties

Biopolymers have emerged as innovative materials for soil stabilization in geotechnical engineering. They provide an environmentally friendly alternative to traditional chemical stabilizers like cement and lime. Their application addresses issues such as soil erosion, strength enhancement, and overall soil improvement.

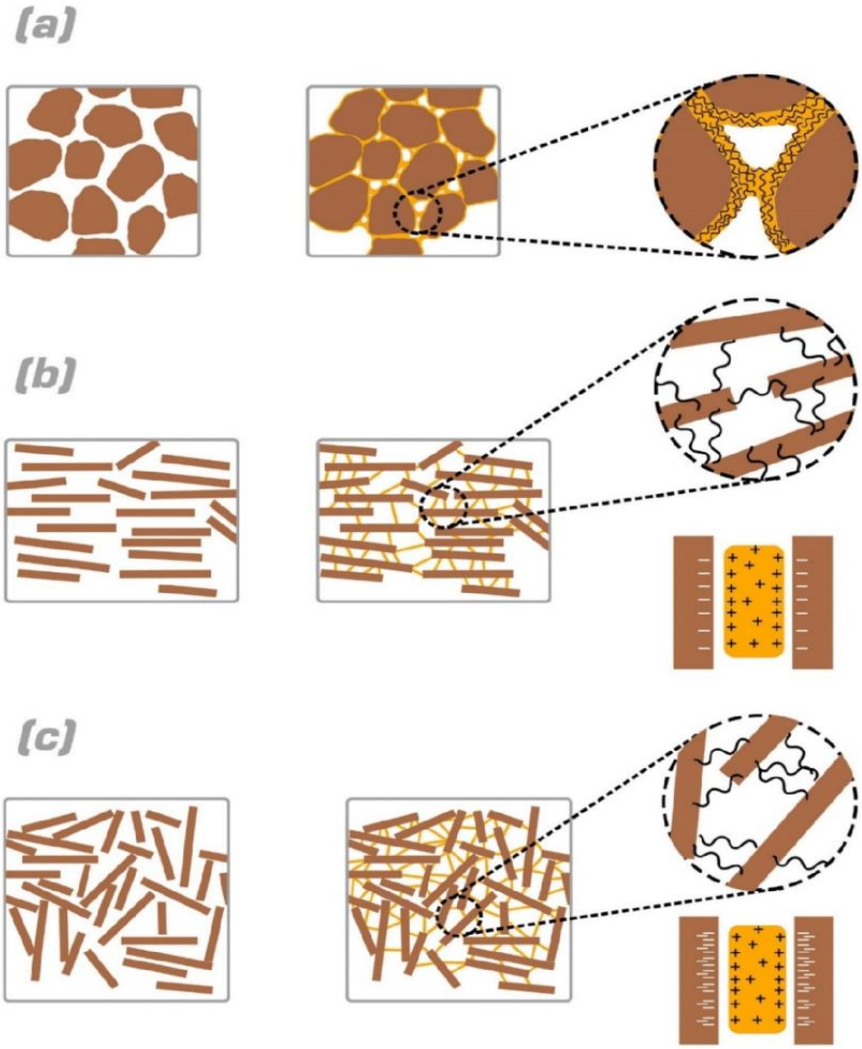


Figure 1: Biopolymer interaction with different kinds of soils (a) sand, (b) kaolinite clay, (c) montmorillonite [9]

When the long-term age effect is taken into consideration, the outcomes of UCS on the soil are shown in Figure 2, which compares the results with and without XG. As a result of XG therapy, the UCS value increases significantly, and the ageing process is accelerated at a quick pace. The graphic makes it abundantly evident that natural soil has a minimum UCS value, which is described in detail. There is a tendency for these numbers to increase in tandem with the quantity of XG material that is raised. Remembering that the UCS numbers increase as the samples age is an extremely important point to keep in mind. Based on the findings, it appears that even a small amount of XG, when combined with a prolonged curing period, has the potential to result in a substantial rise in the values of UCS.

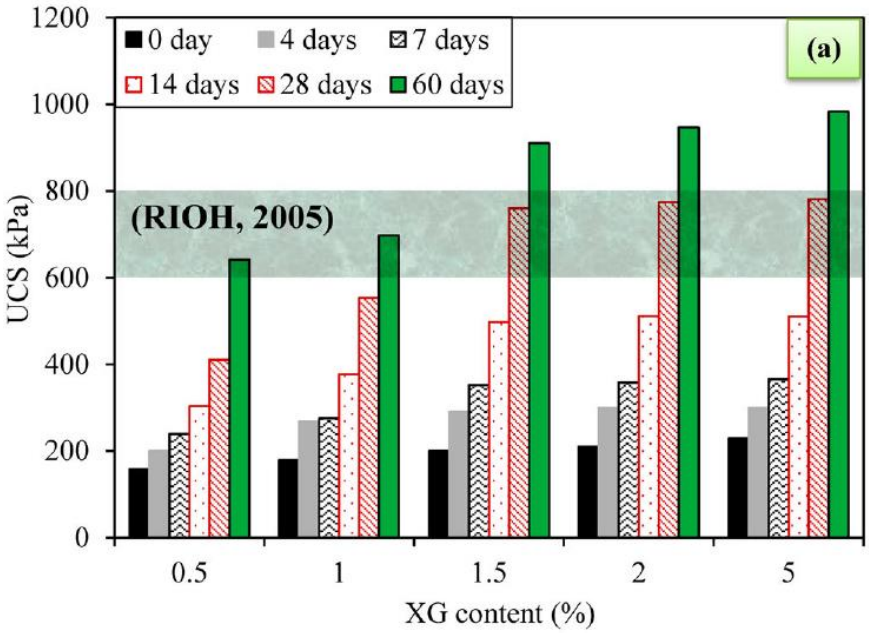
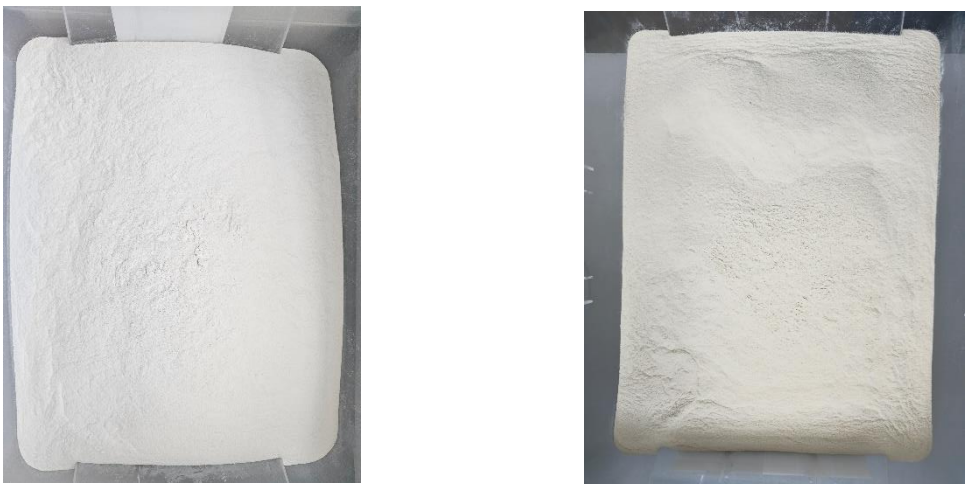


Figure 2: Variation of UCS with aging periods [11]

4. Materials

A total of three soil localities are targeted to collect the soil from three different regions in Slovakia, namely Jelšový Potok, Lutila, and Nitra. Soil taken from the first two localities consists of bentonites, which are predominantly composed of motmorillonite, while the third type of soil primarily composed of clay with a medium to high plasticity. The soil from each of the sources presents a different geotechnical engineering challenge.

Two biopolymers were selected in this study namely, Xanthan Gum (XG) and Kappa-type Carrageenan (KG) were procured from China with certain specific properties as described in next paragraphs.



(a) (b)

Figure 3: (a) Xanthan Gum, (b) Kappa-Carrageenan

Xanthomonas campestris bacteria naturally produce xanthan gum, a high molecular weight polysaccharide, Although bacteria exist on plants, commercial production employs specific, purified strains of Xanthomonas campestris within a controlled fermentation setting. XG is a powder that varies in hue from off-white to cream. [12]. Xanthan gum is non-toxic, water soluble, odour-less, and shows higher stability in temperature, base stability, acid, and salt, along with high resistance to enzymatic hydrolysis and oxidation [13].

KG is primarily derived from red algae, also known as red seaweed, which includes species such as Kappaphycus and Eucheuma, as well as Chondrus crispus, also known as Irish moss. The sulphate group is what differentiates it from other biopolymers, and it is because of the sulphate group that these biopolymers are primarily responsible for their gelling and ionic properties. On the other hand, there are no silica or alumina groups present [14]. Iota, lambda, and kappa are the three different carrageenan groups that are classified according to the number of sulphate groups that are present. Because it has been demonstrated to produce the most compatible bonding with the soil particles, kappa carrageenan is the material that is utilized in this investigation [15].

Both of the biopolymers that were chosen can be described as having gelling properties. Due to the fact that they immediately form a thick gel upon coming into contact with water, they are able to further prevent and reduce the interaction between water and soil, which results in increased water retention capacity. Furthermore, both substances are characterized by a high viscosity, are susceptible to changes in molecular geometry brought about by temperature, and are employed as thickening agents [16].

5. Method of Research

Water adsorption refers to the capacity of a material to absorb water up to its saturation point. The Enslin Test was conducted to determine the saturation limit in terms of soil adsorption, both with and without the incorporation of biopolymer. This test is applicable exclusively to soils with a particle size of 0.063 mm and smaller. The determination of water adsorption was performed using the Enslin method in accordance with the ČSN 72 1029 standard, which prescribes a specific procedure. In this test, a minimal sample quantity is prepared, typically around 0.3 g ± 1 mg, with a modification that restricts the drying temperature of the sample to 60°C ± 5°C, as per ČSN 72 1009. Essential equipment includes the Enslin apparatus, a weighing balance with an accuracy of 0.0001 g, a desiccator, and some accurate device for time measurement. This straightforward test involves the absorption of water within an arrangement comprising a measuring burette with graduated markings, a water jacket, a sintered glass filter, and connecting tubes as critical components. The absorbed water volume is recorded with an accuracy of 0.01 cm³ at specified intervals until the values of three consecutive readings within these intervals differ by no more than 0.01 cm³. The test is typically conducted at least twice, and the arithmetic mean of all measurements is considered the final [17].The final adsorption is calculated using a simple formula as provided below:

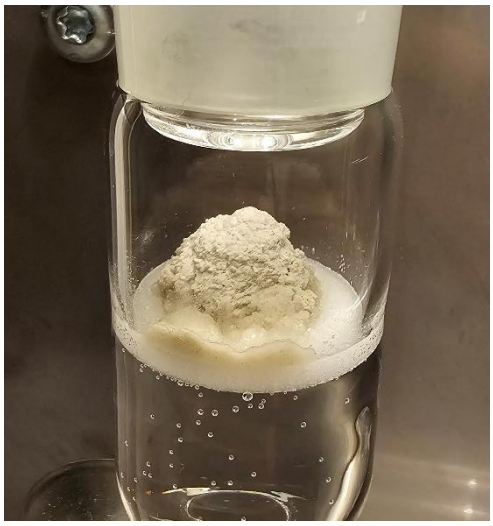
$$E_w = \frac{V.100}{m} \ [cm^3 \, . \, g^{-1}] \quad (1)$$

where, E_w is water adsorption according to Enslin,

V = the difference between the final absorbed volume and the absorbed volume at the beginning of the test, cm^3

m = mass of the soil sample

(a)



(b)

(c)

Figure 4: (a) Enslin Test Apparatus, (b) bentonite-polymer unsaturated sample (c) bentonite-polymer saturated sample

6. Results and Discussion

The Enslin-Neff adsorption test demonstrates that adding xanthan gum changes the way bentonite absorbs water, creating a unique dual-phase behavior. In the first phase (0–200 minutes), the unmodified bentonite has better adsorption because its surface gets wet straight away and it has capillary action. The biopolymer-modified samples, on the other hand, show less initial uptake, with the 5% formulation being the lowest. This is because the thick polymeric layer temporarily protects the clay particles and stops water from getting into the spaces between the layers. A key change occurs between 200 and 300 minutes, indicating the start of the second phase, when the performance order is completely changed. The beginning of xanthan gum swelling and hydration is what causes this inflection point. This gradually opens up the new bridging for water to be absorbed through the polymer network.

This delayed activation causes the modified bentonite to adsorb much faster than pure clay, which allows it to outperform pure clay in the intermediate to long-term stages. The final equilibrium values indicate a substantial increase in the total water-retention capacity. The 10% xanthan gum composite had the highest adsorption, at about 2.1 $cm^3\ g^{-1}$, which is 62% more than pure bentonite.

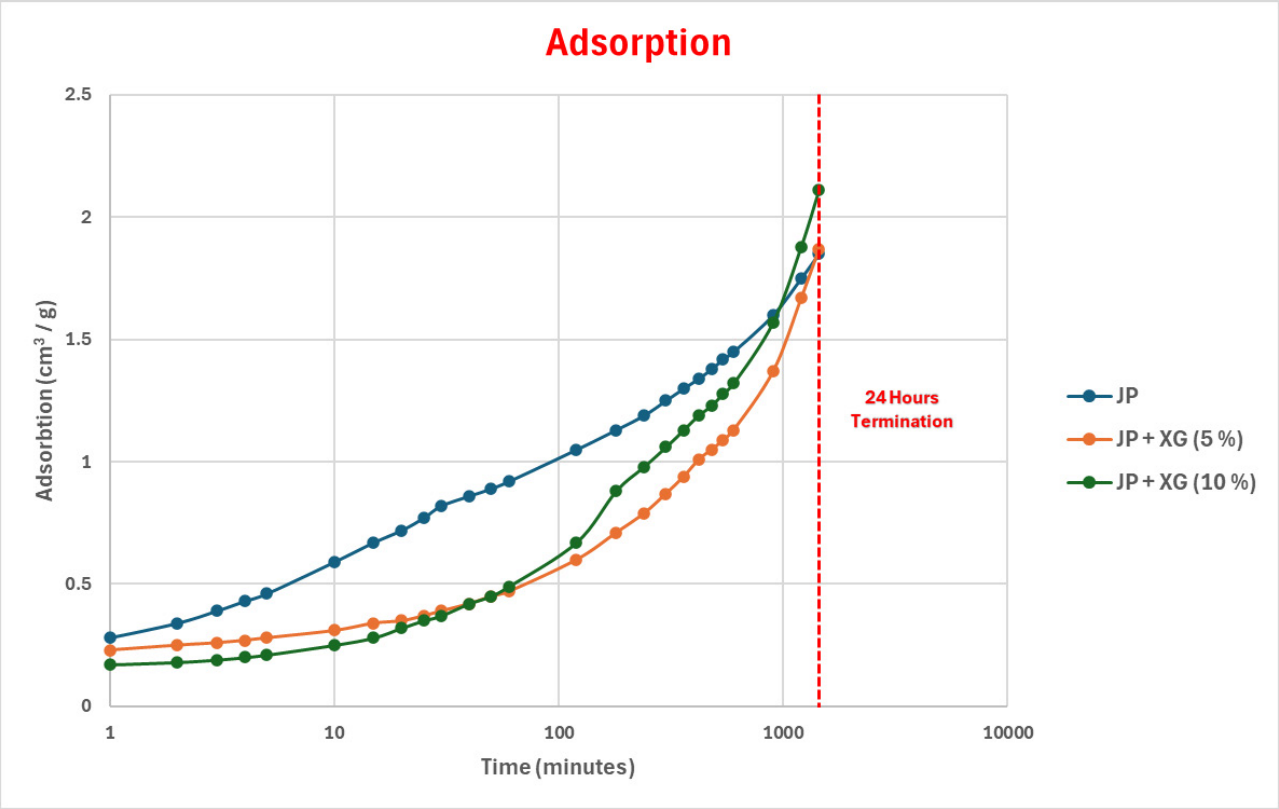


Figure 5: Relationship of time based adsorption for bentonite (JP) and biopolymer-modified bentonite (JP + XG 5 % and 10 %) determined by the Enslin–Neff test

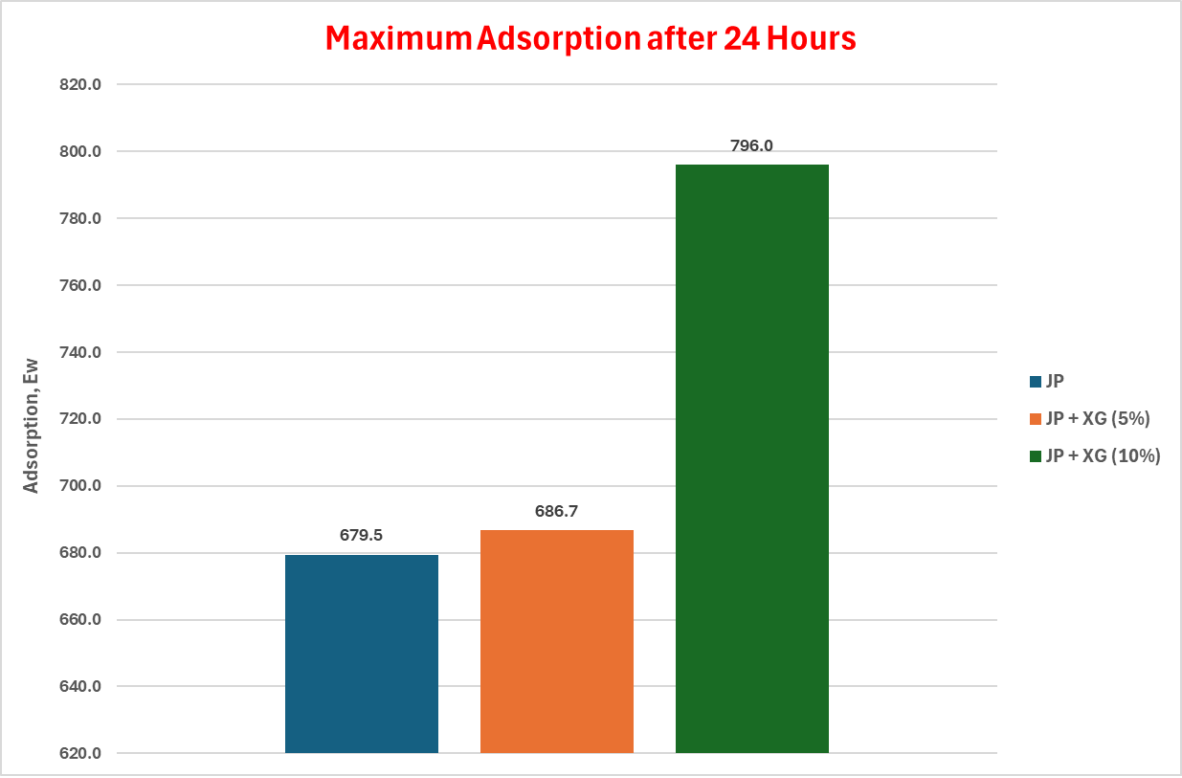


Figure 6: Maximum adsorption E_w of bentonite with XG content after 24 hours from Enslin Neff test

The observed logarithmic adsorption trend confirms a diffusion-controlled mechanism, where the synergistic effect between the clay's swelling and the biopolymer's hydrophilic hydrogel formation results in a dual-porosity network. This change, which gives up a faster initial rate in exchange for much better equilibrium retention and stability, is very advantageous in various geotechnical applications such as barrier liners and drilling fluids that need to keep moisture levels stable over time instead of just soaking it up right away.

From Figure 6, it is clear that 5% XG provided a modest increase (from 679.5 to 686.7 E_w), 10% XG yielded a substantial rise to 796.0 E_w after 24 hours. This improvement is attributed to the formation of a more porous, hydrophilic network that facilitates greater fluid retention.

7. Conclusions

Overall, the Enslin Neff test demonstrated that adding Xanthan Gum biopolymer to bentonite (JP) significantly enhanced its water adsorption capacity in a depending on the concentration. Future research should expand the examination of adsorption behavior for more than 24 hours to characterize long term equilibrium. Moreover, expanding the research to include bentonites from various geological formations and a variety of biopolymers would be significantly valuable. Permeability tests should be conducted to evaluate how biopolymers alter the hydraulic properties of bentonites and high plastic clays. For critical geotechnical applications such as drilling fluid and diaphragm wall trench stabilization, a slurry composed of bentonite and biopolymer could be significantly advantageous.

References

[1] Z.K. Abdalqadir, N.B. Salih, S.J. Hama Salih, Expansive Soil Stabilization Using Steel Factory Dust., Jordan J. Civ. Eng. 18 (2024).

[2] G.P. Ganapathy, S. Kovendiran, R. Arul Murugan, P. Yogeswaran, R. Gobinath, I.I. Akinwumi, M. Thangaraj, S. Muhamed Anas, S. Hema, N. Lokesh, Bio-Enzymatic Stabilization of a Soil Having Poor Engineering Properties, Int. J. Civ. Eng. 15 (2016) 401–409. https://doi.org/10.1007/s40999-016-0056-8.

[3] P.K. Kolay, K.C. Ramesh, Reduction of Expansive Index, Swelling and Compression Behavior of Kaolinite and Bentonite Clay with Sand and Class C Fly Ash, Geotech. Geol. Eng. 34 (2015) 87–101. https://doi.org/10.1007/s10706-015-9930-4.

[4] S. Kumar, W.-L. Yong, Effect of Bentonite on Compacted Clay Landfill Barriers, Soil Sediment Contam. An Int. J. 11 (2002) 71–89. https://doi.org/10.1080/20025891106709.

[5] K. Zhu, K. Zhu, Y. He, Y. He, Q. He, Q. He, Q. He, W. Lou, Z. Zhang, Z. Zhang, K. Zhang, K. Zhang, Effects of ionic strength and bentonite ratio on the migration of Cr(VI) in clayey soil-bentonite engineered barrier., Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 31 (2024) 45310–45325. https://doi.org/10.1007/s11356-024-34170-4.

[6] Markus Fagervik, No Title, (n.d.). https://www.nordkalk.com/lime-and-co2-whats-the-big-deal/.

[7] S. Kumar, B.D. Yadav, R. Raj, A review on the application of biopolymers (xanthan, agar and guar) for sustainable improvement of soil, Discov. Appl. Sci. 6 (2024) 393.

[8] R.M. Andrew, Global CO 2 emissions from cement production, Earth Syst. Sci. Data 10 (2018) 195–217.

[9] H. Fatehi, D.E.L. Ong, J. Yu, I. Chang, Biopolymers as Green Binders for Soil Improvement in Geotechnical Applications: A Review, Geosciences 11 (2021) 291. https://doi.org/10.3390/geosciences11070291.

[10] N. Latifi, S. Horpibulsuk, C.L. Meehan, M.Z. Abd Majid, M.M. Tahir, E.T. Mohamad, Improvement of problematic soils with biopolymer—an environmentally friendly soil stabilizer, J. Mater. Civ. Eng. 29 (2017) 4016204.
[11] M. Hamza, Z. Nie, M. Aziz, N. Ijaz, M.F. Ameer, Z. Ijaz, Geotechnical properties of problematic expansive subgrade stabilized with xanthan gum biopolymer, Road Mater. Pavement Des. 24 (2023) 1869–1883. https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2092027.
[12] I.I. Osovskaya, A.M. Borodina, A. V Kurzin, V.I. Roshchin, Synthesis and Properties of Modified Xanthan Gum, Russ. J. Bioorganic Chem. 48 (2022) 1526–1533. https://doi.org/10.1134/s1068162022070226.
[13] S. Rosalam, R. England, Review of xanthan gum production from unmodified starches by Xanthomonas comprestris sp., Enzyme Microb. Technol. 39 (2006) 197–207. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.10.019.
[14] R.R. Loureiro, M.L. Cornish, I.C. Neish, Applications of Carrageenan: With Special Reference to Iota and Kappa Forms as Derived from the Eucheumatoid Seaweeds, Trop. Seaweed Farming Trends, Probl. Oppor. (2017) 165–171. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63498-2_11.
[15] R. Rupert, K.F. Rodrigues, V.Y. Thien, W.T.L. Yong, Carrageenan From Kappaphycus alvarezii (Rhodophyta, Solieriaceae): Metabolism, Structure, Production, and Application, Front. Plant Sci. 13 (2022). https://doi.org/10.3389/fpls.2022.859635.
[16] E.M. Nsengiyumva, P. Alexandridis, Xanthan gum in aqueous solutions: Fundamentals and applications, Int. J. Biol. Macromol. 216 (2022) 583–604. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.189.
[17] Stanoveni Adsorpce Vody Podle Enslina, 1974.

Samuel Paulík[1]

Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 2. ročník

EXPERIMENTÁLNE OVERENIE POUŽITEĽNOSTI BETÓNU S RECYKLOVANÝM KAMENIVOM PRE MOSTNÉ KONŠTRUKCIE

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATE FOR BRIDGE STRUCTURES

Abstract

This study evaluates recycled concrete aggregate (RCA) sourced from demolished structures as natural aggregate substitute in structural concrete. Bridge and civil engineering members are exposed to freeze-thaw cycles (XF), de-icing salts (XD), and carbonation (XC). Despite RCA's characteristic higher porosity and microcracking, an optimized mix design with air entrainment and adjusted water-cement ratio achieved C40/50 strength class with 56% coarse RCA replacement – exceeding the reference natural aggregate concrete (C30/37) The resulting elastic modulus of 34.5GPa showed a moderate reduction relative to the reference mix. Achieving required workability proved challenging due to RCA's high water absorption, necessitating careful mix design adjustments for practical application.

Kľúčové slová:

recyklované betónové kamenivo; trvanlivostné charakteristiky betónu; konzistencia; mrazuvzdornosť; pevnosť v tlaku; modul pružnosti; inžinierske stavby

1. Úvod

Stavebný priemysel čelí paradoxnej situácii v oblasti využitia recyklovaných materiálov. Napriek desaťročiam intenzívneho výskumu potvrdzujúceho teoretickú použiteľnosť recyklovaného betónového kameniva (ďalej len ako RCA) v konštrukčnom betóne mostných konštrukcií, jeho praktické využitie v kritickej infraštruktúre zostáva minimálne. Tento stav nie je spôsobený primárne jeho nevhodnosťou, skôr reštriktívnymi regulačnými bariérami súčasných európskych noriem a opatrnosťou panujúcou v inžinierskej praxi, ktorá je naviazaná na tieto normy a predpisy. Pre porovnanie norma EN 206+A2:2021 [1] povoľuje RCA len pre betónové konštrukcie v triedach prostrediach X0, XC1-XC4, XF1, XA1 a XD1 [1]. Mostné konštrukcie sú najčastejšie zatriedené do agresívnejšieho prostredia zmrazovania a rozmrazovania, konkrétne XF4 a sú vystavené aj rozmrazovacím soliam, (prostredie XD3) z priameho ostrekovania a za prítomnosti chloridov. Ako posledná je trieda prostredia XS, ktorej sú vystavené najmä konštrukcie v blízkosti pobrežia. Spodná stavba mosta typicky vyžaduje použitie betónu pre kombinované environmentálne zaťaženie v

[1] Ing., Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra betónovch konštrukcií a mostov, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava

kombinácií XD3+XF2 alebo XF4+XC4, čo okamžite diskvalifikuje RCA na použitie v konštrukčnom betóne podľa súčasných predpisov. Experimentálne overenie na sérii betónových zmesí potvrdilo, že dosiahnutie všetkých požadovaných parametrov trvanlivosti súčasne predstavuje výzvu, ktorá spolu s regulačnými obmedzeniami a opatrnosťou inžinierskej praxe vytvára bariéru pre praktickú implementáciu RCA v konštrukčnom betóne mostného staviteľstva.

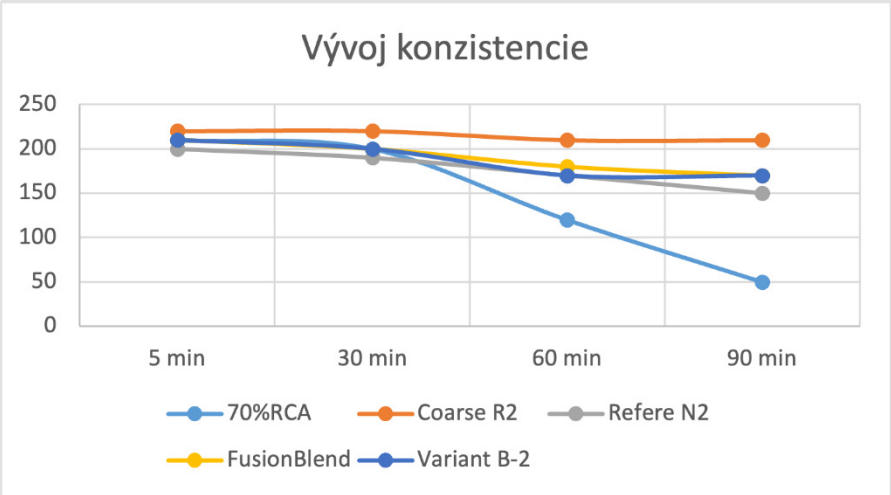
2. Konfrontácia teoretických a experimentálnych výsledkov

Rozsiahly výskum potvrdzuje technickú realizovateľnosť použitia RCA pri vhodnom návrhu betónovej zmesi. Štúdie ukazujú, že betón z recyklovaného betónového kameniva môže dosiahnuť akceptovateľnú pevnosť v tlaku vyžadovanú napríklad pre konštrukcie mostných pilierov a opôr, pričom až nad 30% nahradenia hrubého RCA dochádza ku zanedbateľnému zníženiu pevnosti ak je precízne nastavený pomer vody a cementu. Pri 50% náhrade pevnosť betónu podľa literatúry klesá o 15-25%, čo je stále v rozsahu, ktorý možno kompenzovať úpravou návrhu zmesi [2,3].

Experimentálne testovanie zmesi betónu s 56% celkovou náhradou RCA (CoarseR2), čo predstavuje 100% náhradu hrubej frakcie, dosiahlo pevnosť v tlaku 57,1 MPa pri použitom pomere voda-cement 0,34. Tento výsledok výrazne prekračuje triedu betónu C30/37 dosiahnutú pri referenčnej zmesi bez RCA, s pevnosťou 46,63 MPa. Avšak zmesi s úplnou a výraznou náhradou všetkých frakcií vrátane jemnej frakcie (100% RCA a 70%RCA) vykazovali nižšiu pevnosť a bol zaznamenaný výrazný pokles konzistencie v čase (od 5 do 90min od času pridania cementu), čo potvrdzuje potrebu selektívnej náhrady kameniva zameranej na hrubé frakcie.

Tab. 1: Vplyv obsahu RCA na mechanické vlastnosti betónu

Označenie zmesi	Obsah RCA [%]	Stratégia náhrady	Typ nahrádzanej frakcie	Dosiahnutá pevnosť [MPa]	Poznámka
Refere N2	0	-	-	46,63	Referenčná zmes
Coarse R2	56*	Selektívna	Iba hrubá frakcia 4/8, 8/16 (100%)	57,1	-
FusionBlend	71	Selektívna	Všetky frakcie	49,33	Optimalizovaná krivka zrnitosti
100%	100	Rovnomerná	Všetky frakcie	43,43	Nedosiahnutá požadovaná konzistencia
70%	70	Rovnomerná	Všetky frakcie	41,1	Nedosiahnutá požadovaná konzistencia



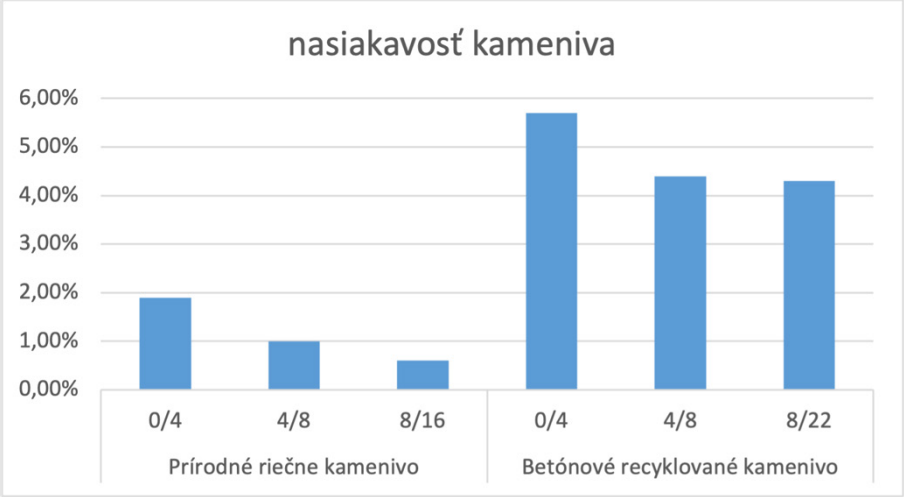
Obr. 2: Graf vývoja konzistencie receptúr v čase

Kritickejším aspektom je trvanlivosť materiálu, ktorá je základom pre 100-ročnú požadovanú životnosť mostov podľa STN EN 1990 [4]. Dôležitým aspektom pre dlhú životnosť je odolnosť voči karbonatácií - chemický proces, pri ktorom do betónu preniká oxid uhličitý (CO_2) zo vzduchu alebo vody. Oxid uhličitý v betóne reaguje s hydroxidom vápenatým ($Ca(OH)_2$). Pri tejto reakcii sa tvorí uhličitan vápenatý $CaCO_3$ a znižuje sa pH, v ktorom sa vytvára pasivačná vrstva nepriepustných oxidov železa na povrchu výstuže. Keď pH klesne pod 9 v dôsledku karbonatácie, táto ochranná vrstva nie je stabilná a dochádza ku prieniku kyslíku a vlhkosti ku povrchu výstuže a dochádza ku korózii. Hĺbka karbonatizácie betónu s RCA by sa mala zvýšiť v porovnaní s betónom z prírodného kameniva z dôvodu vyššej pórovitosti reziduálnej malty na povrchu zŕn RCA [5]. Experimentálne testovanie v klimatickej komore podľa metodiky normy STN EN 12390-12 [6] ukázalo, že betóny so 100% náhradou RCA môžu dosahovať koeficient karbonatizácie KAC = 1,132 mm/√dni oproti referenčnej zmesi bez RCA kde sa dosiahlo KAC = 0,168 mm/√dni. Tento výsledok predstavuje takmer 7-násobné zrýchlenie prenikania CO_2 do betónu so 100% náhradou recyklovaného kameniva za prírodné. Optimalizovaná zmes FusionBlend s 71% RCA a zníženým pomerom voda-cement na úrovni 0,33 dosiahla výrazne lepší výsledok KAC = 0,040 mm/√dni, čo dokonca prekonalo difúzne vlastnosti referenčnej zmesi pri prieniku CO_2, demonštrujúc možnosť kompenzácie negatívnych efektov RCA prostredníctvom optimalizovaného návrhu. Výsledky dosiahnutých odolností na základe experimentu dokumentuje tabuľka 3.

Tab. 3: Odolnosť betónových zmesí voči karbonatizácii

Označenie zmesi	Obsah RCA[%]	KAC [mm/√dni]	Relatívna zmena hĺbky prieniku vs. Referenčná zmes	Násobok karbonatizáce	Vývoj karbonatizácie
RefereN2	0	0,168	-	1,0×	Referenčná
Coarse R2	56	0,107	-36,3%	0,64×	Zlepšenie
FusionBlend	71	0,040	-76,2%	**0,24×**	Výrazné zlepšenie
70%	70	1,102	+556%	6,56×	Výrazné zhoršenie
100%	100	1,132	+574%	6,74×	Výrazné zhoršenie

Základnou charakteristikou RCA je výrazne vyššia nasiakavosť. Experimentálne merania ukázali, že nasiakavosť jemnozrnnej frakcie RCA 0/4 dosahuje 5,7% v porovnaní s 1,9% u prírodného kameniva tej istej frakcie. Jedná sa teda o 3-násobný nárast, ktorý negatívne ovplyvní aj difúzne vlastnosti betónu a s ňou spojenú trvanlivosť. Hrubé frakcie RCA 4/8 a 8/16 vykazujú nasiakavosť 4,40% a 4,30% oproti 1,00% a 0,60% u prírodného kameniva. Toto výrazne zvýšené nasýtenie vodou priamo súvisí s 20-56% obsahom reziduálnej cementovej malty nachádzajúcej sa na povrchu predrveného kameniva, vytvárajúcej mikroskálovú pórovitosť, ktorú konvenčný betón nemá [7]. Zvýšený obsah prachových častíc menších ako 0,063 mm, dosahujúci takmer 13% u frakcie RCA 0/4 v porovnaní s prakticky nulovým obsahom u prírodného kameniva, ďalej komplikuje návrh zmesi a ovplyvňuje potrebu superplastifikačných prísad a technologickej prípravy zmesi ako je napríklad predvlhčenie kameniva.



Obr. 4: Graf nasiakavostí kameniva

Tieto negatívne efekty však možno výrazne zmierniť strategickým použitím doplnkových puzolánových materiálov. Zahrnutie 30% granulovanej vysokopecnej trosky znižuje difúziu chloridov až o 34% [8]. Kombinácia popolčeka s úpravou RCA môže znížiť difúzny koeficient betónu proti prieniku chloridov. Dosiahnuť zvýšenie odolnosti voči zmrazovaniu a rozmrazovaniu je možné, prevzdušnením betónovej zmesi, obsahom vzduchu 4,5-6,5% z celkového objemu. Vzduch sa v zmesi nachádza vo forme malých vzduchových bubliniek s veľkosťou pórov 0,01 až 0,3 mm s rozostupom dutín, ≤2 mm. To umožňuje zmierňovať tlaky spôsobené expanziou zamŕzajúcej vody, nasiaknutej v betóne [9].

Experimentálne testovanie odolnosti voči zmrazovaniu a rozmrazovaniu pre triedu prostredia XF4, ktorá vyžaduje 100 zmrazovacích cyklov, za prítomnosti rozmrazovacích solí, odhalilo signifikantné limitácie betónových zmesí s recyklovaným betónovým kamenivom. Referenčná zmes bez RCA s obsahom vzduchu 4,9% dosiahla 0,80 súčiniteľ mrazuvzdornosti definovaný ako pomer pevnosti v ťahu za ohybu zmrazovaných vzoriek oproti vzorkám udržiavaným v ustálených podmienkach. Optimalizovaná zmes CoarseR2 s úplnou náhradou hrubej frakcie kameniva (56% celková náhrada RCA) a obsahom vzduchu 4,6% dosiahla len 0,23 súčiniteľ mrazuvzdornosti a zmes FusionBlend s 71% celkovou náhradou RCA vrátane jemnej frakcie 0/4 dosiahla 0,18 súčiniteľ mrazuvzdornosti pri obsahu vzduchu 4,6%. Dosiahnuté výsledky laboratórneho experimentu dokumentuje tabuľka 5.

Tab. 5: Odolnosť betónových zmesí voči zmrazovaniu a rozmrazovaniu

Označenie zmesi	Obsah RCA[%]	V/C [-]	Obsah vzduchu [%]	Súčiniteľ mrazuvzdornosti	Počet zmrazovacích cyklov
RefereN2	0	0,38	4,9	0,80	100
Coarse R2	56	0,34	4,6	0,23	100
FusionBlend	71	0,33	4,6	0,18	100
70%	70	0,38	2,2	0	100
100%	100	0,38	0	0	100
Variant B-2	58	0,38	6,2	1,02 (XF2)	50

Zmesi s úplnou náhradou prírodného kameniva za recyklované vrátane jemnej frakcie (100% RCA) a s vysokou náhradou 70% RCA bez dostatočného prevzdušnenia vykazovali úplnú dezintegráciu počas zmrazovacích cyklov, čo sa prejavilo nulovou reziduálnou pevnosťou (0% relatívna mrazuvzdornosť - nemerateľná). Tieto výsledky jednoznačne preukazujú, že betónové zmesi s RCA bez prevzdušnenia nedokážu splniť požiadavky pre triedu XF4. V kontraste s týmito výsledkami variant B-2 s 56% náhradou RCA a obsahom vzduchu 6,2% úspešne absolvoval menej náročnú skúšku pre triedu prostredia XF2 (50 zmrazovacích cyklov za prítomnosti rozmrazovacích chemikálií) so súčiniteľom mrazuvzdornosti 1,02 pri pevnosti v ťahu za ohybu a súčiniteľ mrazuvzdornosti pri pevnosti v tlaku 1,08 čo indikuje, že pri nižšom počte zmrazovacích cyklov a vhodnom prevzdušnení môžu zmesi s RCA dosiahnuť uspokojivú odolnosť voči cyklom zmrazovania a rozmrazovania.

Mechanické vlastnosti tiež vyžadujú pozornosť v konštrukčnom návrhu. Experimentálne testovanie ukázalo, že modul pružnosti betónu sa znižuje s rastúcim podielom RCA. Referenčná zmes bez RCA,

podľa tabuľky 6, dosiahla modul pružnosti 36,5 GPa, zatiaľ čo zmes CoarseR2 s 56% RCA dosiahla 34,5 GPa (pokles o 5,5%), zmes FusionBlend s 71% RCA dosiahla 32,5 GPa (pokles o 11%), a zmes so 100% RCA dosiahla len 27,5 GPa (pokles o 25%). Tento pokles modulu pružnosti vyplýva zo štrukturálneho poškodenia predrveného kameniva a z mikrotrhlín nachádzajúcich sa v reziduálnej cementovej malte na povrchu zŕn v porovnaní s prírodným kamenivom. Nízky modul pružnosti u konštrukčných betónov je všeobecne inžinierskou praxu považovaný za neželaný nakoľko je zdrojom väčších deformácií pri zaťažení a vyžaduje si úpravu prierezových charakteristík konštrukčných prvkov alebo geometrie nosných systémov.

Tab. 6: Modul pružnosti betónových zmesí s RCA

Označenie zmesi	Obsah RCA[%]	Modul pružnosti [GPa]
RefereN2	0	36,5
Coarse R2	56	34,5
FusionBlend	71	32,5
100%	100	27,5

3. Praktické aplikácie

Aplikačná prax predstavuje kľúčové validačné kritérium pre hodnotenie pripravenosti technologického riešenia na širšiu implementáciu v stavebníctve. Systematický prehľad realizovaných mostných konštrukcií v európskom a globálnom priestore odhaľuje výraznú diskrepanciu medzi vedeckovýskumným záujmom o recyklovaný betónový agregát a jeho skutočným využitím v štrukturálnych aplikáciách mostného inžinierstva. Napriek existencii rozvinutej infraštruktúry recyklácie betónu v Nemecku (90-95% miera recyklácie), Holandsku (98% miera recyklácie), Belgicku a Dánsku (80-90% miera recyklácie), aplikácie sa prevažne koncentrujú na základy budov, podkladové vrstvy komunikácií a prefabrikované výrobky, nie na kritickú dopravnú infraštruktúru [10,11]. Francúzsky národný výskumný projekt RECYBETON, realizovaný konzorciom 47 partnerov v období 2012-2018, predstavuje jediný verifikovateľný prípad demonštračného mostného objektu s parciálnou integráciou RCA, percentuálny podiel RCA obsiahnutý v konštrukcii tohto mosta je 20% [12]. Projekt SERAMCO (Secondary Raw Materials for Concrete Precast Products, 2017-2021), vyvinul betónové zmesi s až 100% recyklovaných kamenív, ale demonštračné aplikácie sa obmedzili na parkovacie plochy, opevňovacie múry a pódiá bez začlenenia mostných konštrukcií [13]. Most RE:CRETE vo Fribourgu vo Švajčiarsku, realizovaný École Polytechnique Fédérale de Lausanne v roku 2021 ako 10-metrový predpätý segmentový oblúk, reprezentuje technologicky odlišný prístup využívajúci 25 opätovne použitých betónových blokov vyrezaných z demolovanej budovy, čo predstavuje znovu použitie betónových prvkov namiesto začlenenia drveného recyklovaného kameniva [14]. Experimentálne projekty ako 3D tlačený oblúkový most Striatus v Benátkach demonštrujú alternatívne výrobné technológie s recyklovanými materiálmi, avšak bez aplikačnej relevancie pre konvenčnú mostnú prax [15]. Táto zásadná diskrepancia medzi rozsiahlou výskumnou aktivitou a minimálnou praktickou implementáciou indikuje pretrvávajúce technické, regulačné a ekonomické bariéry v transfere laboratórnych

poznatkov do inžinierskej praxe mostného stavebníctva. Pre úzky rozsah mostných prvkov teoreticky povolených podľa súčasných noriem – základy v neagresívnych pôdach (XC2+XD1), chránené vnútorné prvky (XC1-XC2) alebo komponenty presahujúce 12 metrov od vozovky v miernom klimatickom pásme (XC3+XF1) zostáva aplikácia RCA výrazne limitovaná.

4. Záver

Experimentálnym výskumom bolo zistené, že optimalizácia zrnitostnej krivky približujúcej sa ideálnej krivke podľa Bolomeyovej rovnice v kombinácii s redukovaným efektívnym pomerom voda/cement umožňuje dosiahnuť výrazné zlepšenie trvanlivostných vlastností. Zmes FusionBlend s 71% celkovou náhradou RCA dosiahla koeficient karbonatizácie KAC = 0,040 mm/√dni pri pevnosti 49,33 MPa, čo je výrazne lepšie ako referenčná zmes bez RCA (KAC = 0,168 mm/√dni, s dosiahnutou pevnosťou 46,63 MPa). Tento výsledok demonštruje, že pri starostlivom návrhu môže betón s vysokým podielom RCA dokonca prekonať konvenčný betón v niektorých aspektoch trvanlivosti, konkrétne v odolnosti voči karbonatizácii.

Súčasné dôkazy z vedeckej literatúry a experimentálneho overenia potvrdzujú, že betón z recyklovaného betónového kameniva môže dosiahnuť primerané mechanické vlastnosti a selektívne vynikajúce charakteristiky trvanlivosti pre aplikácie v mostných konštrukciách prostredníctvom správneho výberu zložiek, optimalizovaného návrhu zmesi so zníženým pomerom voda-cement. Avšak kritickým nedostatkom v odolnosti voči cyklom zmrazovania a rozmrazovania pre expozičnú triedu XF4 predstavuje zásadnú technickú bariéru, ktorá spolu s konzervatívnymi normatívnymi rámcami zabraňuje širšej praktickej implementácii. Tento rozpor medzi laboratórnym potenciálom a aplikačnou praxou vyžaduje paralelný vývojový prístup: úpravu regulačných rámcov umožňujúcu integráciu RCA do súčasne obmedzených expozičných tried, podmienenú zdokumentovanou validáciou dlhodobých materiálových charakteristík, a realizáciu full-scale pilotných mostných projektov s komplexným in-situ monitorovaním, ktoré umožnia konfrontáciu teoretických predpovedí a laboratórnych poznatkov so skutočným správaním materiálu pod reálnymi expozičnými a zaťažovacími podmienkami, vrátane kritickej verifikácie odolnosti voči zmrazovacím cyklom v prostredí s rozmrazovacími soľami.

Poďakovanie

Táto práca bola financovaná EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I03-03-V04-00275.

Literatúra

[1] STN EN 206+A2:2021. Betón. Špecifikácia, Vlastnosti, Výroba a Zhoda

[2] MCNEIL, Katrina; KANG, H. K. Recycled Concrete Aggregates: A Review, International Journal of Concrete Structures and Materials. 2013.

[3] Jagadesh, P.; Karthik, K.; Kalaivani, P.; Karalar, M.; Althaqafi, E.; Madenci, E.; Özkılıç, Y.O. Examining the Influence of Recycled Aggregates on the Fresh and Mechanical Characteristics of High-Strength Concrete: A Comprehensive Review. Sustainability 2024, 16, 9052. https://doi.org/10.3390/su16209052

[4] STN EN 1990:2009. Zásady navrhovania konštrukcií.

[5] Pedro, D., de Brito, J., & Evangelista, L. (2018). Durability of recycled aggregate concrete – A review. Construction and Building Materials, 179, 1095-1110. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.136

[6] STN EN 12390-12. 2020. Skúšanie Zatvrdnutého Betónu. Časť 12: Stanovenie Odolnosti Betónu Proti Karbonatizácii - Zrýchlená Metóda Karbonatizácie.

[7] Junior, G.A.F.; Leite, J.C.T.; Mendez, G.d.P.; Haddad, A.N.; Silva, J.A.F.; da Costa, B.B.F. A Review of the Characteristics of Recycled Aggregates and the Mechanical Properties of Concrete Produced by Replacing Natural Coarse Aggregates with Recycled Ones—Fostering Resilient and Sustainable Infrastructures. *Infrastructures* **2025**, *10*, 213. doi.org/10.3390/infrastructures10080213

[8] Zhang, Y., Luo, W., Wang, J., Wang, Y., Xu, Y., & Xiao, J. (2021). Methods for improving the durability of recycled aggregate concrete: A review. Journal of Materials Research and Technology, 15, 6367-6386. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.085

[9] Ing. Stanislav Unčík., prof. *Ovplyvňovanie vlastností betónu prísadami*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2013. isbn 978-80-227-3867-5.

[10] Mostert, C.; Weber, C.; Bringezu, S. Modelling and Simulation of Building Material Flows: Assessing the Potential for Concrete Recycling in the German Construction Sector. *Recycling* **2022**, *7*, 13. https://doi.org/10.3390/recycling7020013

[11] Vyncke, J. (2010). Recycling of C&D Waste in Belgium: State-of-the-Art and Opportunities for Technology Transfer.

[12] Colina, H. (2018). A French National R&D Project on Complete Recycling of Concretes. Presentation at SeRaMCo Conference, Luxembourg. Retrieved from https://seramco.uni.lu/wp-content/uploads/sites/85/2018/12/12-Horacio-Colina-A-French-National-RD-project-on-Complete-Recycling-of-Concretes.pdf

[13] Glock, C. (Ed.). (2020). Final Conference of SeRaMCo: Precast Concrete in the Circular Economy, Conference Proceedings, March 25-26, 2020. Technische Universität Kaiserslautern, Germany. Interreg North-West Europe. Retrieved from https://vb.nweurope.eu/media/12681/conferencebooklet_final_180520-1.pdf

[14] [15] Devènes, J., Brütting, J., Küpfer, C., Bastien-Masse, M., & Fivet, C. (2022). Re:Crete Footbridge. Construction21. Retrieved from https://www.construction21.org/france/case-studies/h/re-crete-footbridge-en.html

[15] Block, P., Van Mele, T., Dell'Endice, A., et al. (2021). Striatus: 3D concrete printed masonry bridge. Block Research Group, ETH Zürich.

Dana Tomajková [1]
Študijný program: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb, 3. ročník

ANALÝZA VPLYVU ŠÍRKY PLOŠNEJ ZÁKLADOVEJ KONŠTRUKCIE NA VÝZNAM KRITÉRIA POSÚDENIA NA MEDZNÝ STAV ÚNOSNOSTI A POUŽÍVATEĽNOSTI

ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE WIDTH OF THE SHALLOW FOUNDATIONS ON THE SIGNIFICANCE OF THE ASSESSMENT CRITERIA FOR THE ULTIMATE AND SERVICEABILITY LIMIT STATE

Abstract
Foundations are part of the load-bearing structures, transferring load from the superstructure to the subsoil. Shallow foundations, especially foundation slabs, can provide an efficient and a reliable solution even for high-rise buildings or structures founded in complex geological conditions. Several authors addressed shallow foundations, defining the width of foundations at which the serviceability limit state becomes decisive in the design. However, most studies focus on smaller foundations (strips, footings) and cannot be applied to larger foundations. The article focuses on the validity of these relationships for larger foundation dimensions and analyzes the influence of the width of the foundation slab on contact stress and vertical bearing capacity. The geotechnical analysis is carried out as a parametric study in accordance with valid STN for various foundation widths, load intensities and subsoil properties.

Kľúčové slová / Key Words
Zakladanie výškových budov; plošné základy; medzný stav únosnosti; medzný stav používateľnosti; šírka základovej konštrukcie.

1. Úvod

Pri návrhu základových konštrukcií je nevyhnutné overiť ich spoľahlivosť prostredníctvom výpočtu medzného stavu únosnosti (MSÚ, resp. 1. MS) a medzného stavu používateľnosti (MSP, resp. 2. MS). Dôležitým aspektom, ktorý je potrebný zohľadniť, je aj hospodárnosť návrhu, keďže základy stavebných konštrukcií predstavujú významnú časť nákladov. Preto okrem spoľahlivosti je potrebné pristupovať k návrhu ekonomicky, teda docieliť optimálny návrh základovej konštrukcie.

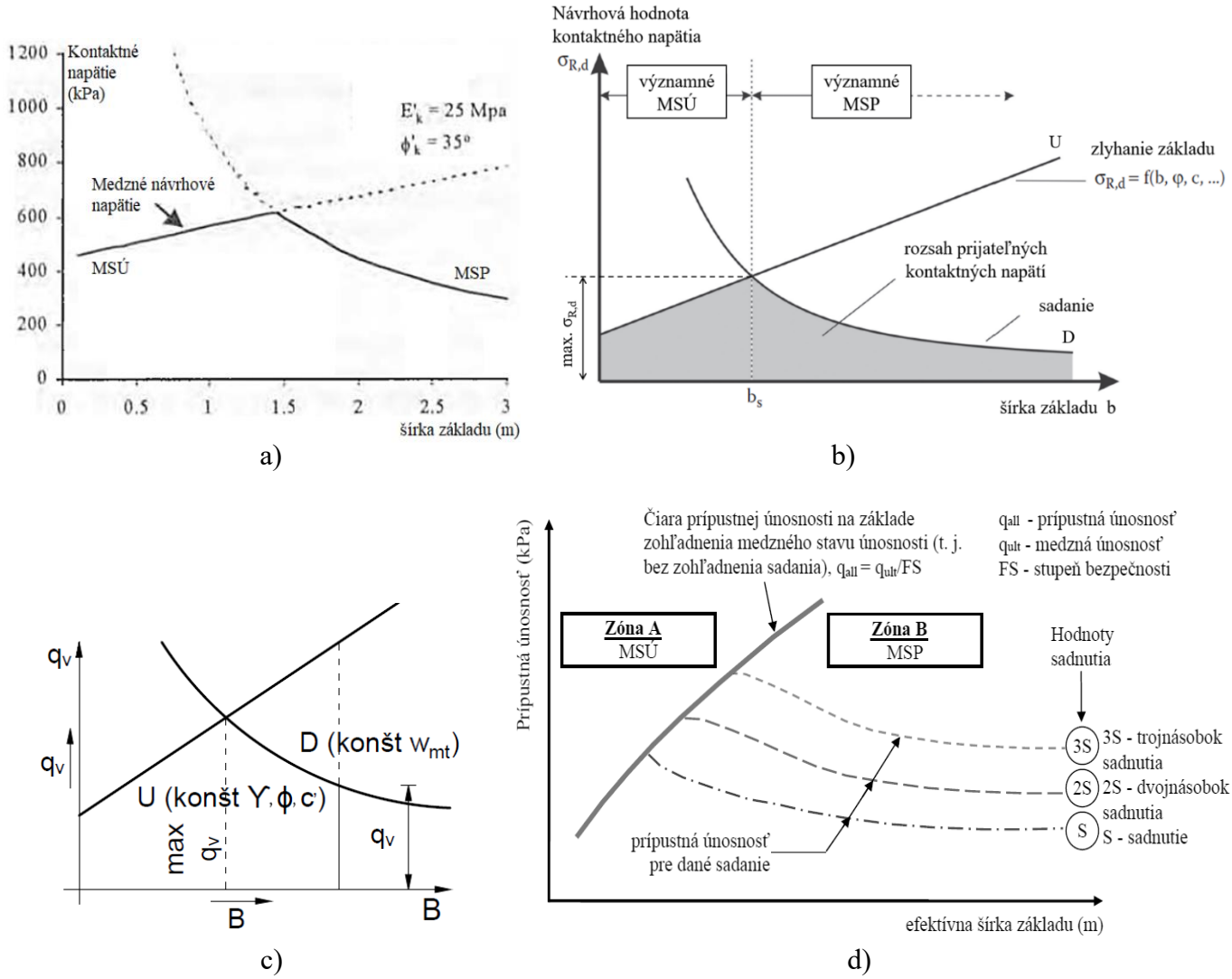
Práca je zameraná na návrh plošných základov výškových budov založených na základových doskách, ktoré patria do tretej geotechnickej kategórie. Pri posudzovaní takýchto stavebných konštrukcií spravidla prvý medzný stav vyhovuje, pričom výpočtom je potrebné preukázať vyhovujúci stav. Pri širokých základových konštrukciách má na veľkosť zvislej únosnosti okrem pevnostných charakteristík zemín (uhol vnútorného trenia φ a súdržnosť c) významný vplyv aj veľkosť klznej plochy pod základovou konštrukciou [1]. Medzný stav používateľnosti je spravidla rozhodujúcim medzným stavom pri návrhu širokých základových konštrukcií. Pri medznom stave používateľnosti sa konštrukcia posudzuje na celkové konečné sadnutie a na nerovnomerné sadnutie.

[1] Ing. Dana Tomajková, Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Pri výškových objektoch založených na širokých (ohybných) základových doskách sú spravidla vypočítané hodnoty konečného a nerovnomerného sadnutia väčšie ako limitné hodnoty sadnutia stanovené podľa STN 73 1001, čo môže viesť k zmene statického návrhu z plošných na hĺbkové základy, čo je cenovo nákladnejšie a technologicky náročnejšie riešenie [2, 3].

1.1 Významnosť vplyvu MSÚ, MSP a šírky základu

Vzťahom medzi MSÚ, MSP a šírkou základu sa zaoberá viacero autorov [3, 4, 5, 6]. Autori uvádzajú význam posúdenia MSÚ a MSP v závislosti od šírky plošnej základovej konštrukcie. Vplyv šírky základu na hodnotu návrhovej únosnosti a kontaktného napätia (sadania) je koncepčne znázornený na obrázku 1 podľa uvedených autorov [3, 4, 5, 6].



Legenda:
D – krivka platná pre MSP v závislosti od šírky základu a návrhovej hodnoty kontaktného napätia [-]
U – priamka platná pre MSÚ v závislosti od šírky základu a návrhovej hodnoty kontaktného napätia [-]

Obrázok 1: Maximálne návrhové kontaktné napätie $\sigma_{R,d}$ pri zohľadnení šírky základu a oblasti významnosti vplyvu medzného stavu únosnosti (MSÚ) a medzného stavu používateľnosti (MSP) a) Orr a Farell, 2001 [5]; b) Katzenbach, 2017 [6]; c) Bažant, 1973 [4]; d) Zhou, 2006 [3].

Pri MSÚ sa posudzuje návrhová hodnota únosnosti R_d, ktorá závisí od pevnostných parametrov základovej pôdy (φ, c) a šírky základu, pričom platí, že čím širší základ, tým väčšia únosnosť, čo znázorňuje priamka U na obrázku 1b,c [6]. Pri MSP sa posudzuje sadanie základovej konštrukcie, ktorého veľkosť je ovplyvnená veľkosťou kontaktného napätia. S rastúcou šírkou plošného základu dochádza k zmenšovaniu kontaktného napätia, čo je znázornené krivkou D.

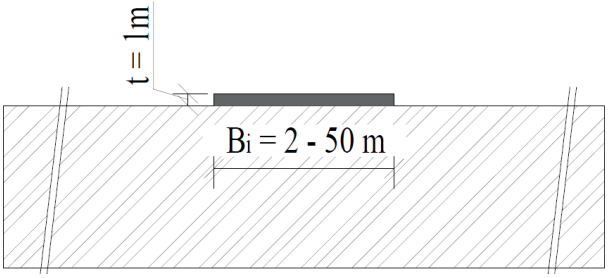
Ako je z grafického zobrazenia na obrázku 1 zrejmé, pri menších šírkach základov je rozhodujúce šmykové porušenie pôdy podľa priamky U, kedy návrhová únosnosť základu je limitujúca pre medzný stav únosnosti. Pri väčších šírkach plošných základov je rozhodujúci medzný stav používateľnosti (priebeh krivky D). Pri návrhu základu rozhoduje kritickejšia hodnota napätia, na obrázku 1b vyznačené ako rozsah prijateľných kontaktných napätí.

Priesečník priamky U a krivky D na obrázku 1 zodpovedá šírke základu b_s, pre ktorú oba medzné stavy majú rovnakú hodnotu napätia [6]. Podľa [4], na obrázku 1c šírka základu b_s pre základy pozemných stavieb je rovná hodnote 1 až 3 m, pričom menšia šírka platí, ak zvolíme menšie prípustné sadnutie. Graficky je tento fakt znázornený aj autorom [3] na obrázku 1d, kedy platí, že čím prísnejší je limit sadnutia, tým nižšia je maximálna návrhová hodnota kontaktného napätia a šírka b_s. Podľa [5] pre plošné základy pri vlastnostiach podložia s E = 25 MPa a φ = 35° je hodnota b_s = 1,5 m (obrázok 1a). Pri zvolenej väčšej hodnote b_s ako udávajú uvedení autori, o návrhu plošných základov rozhoduje medzný stav používateľnosti.

2. Okrajové podmienky geotechnických výpočtov

2.1 Geometrické okrajové podmienky

Geotechnické výpočty sú aplikované na geotechnickom modeli, ktorý uvažuje s plošným základom štvorcového pôdorysu (šírka základu B sa rovná dĺžka základu L). Keďže predmetom je analýza vplyvu šírky základovej konštrukcie (pätky a dosky), uvažujeme s rôznou šírkou základu B (B_1 = 2 m; B_2 = 5 m; B_3 = 10 m; B_4 = 20 m; B_5 = 30 m; B_6 = 40 m; B_7 = 50 m). V analýze je uvažované so základovou konštrukciou výšky t = 1 m pôsobiacou na povrchu homogénneho podložia (obrázok 2).

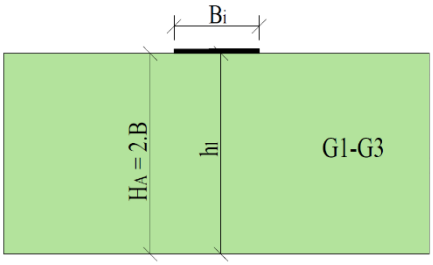


Obrázok 2: Model základovej konštrukcie a homogénneho podložia.

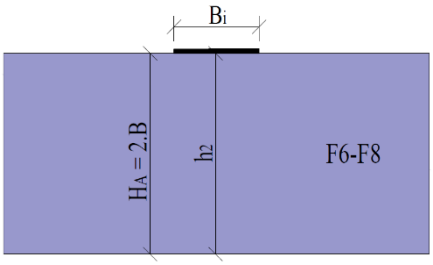
2.2 Materiálové okrajové podmienky

Na vypočítané hodnoty únosnosti a sadnutia majú významný vplyv aj vlastnosti zemín podložia. Preto pre geotechnické výpočty boli vytvorené dva reprezentatívne homogénne modely podložia, ktoré reprezentujú typické geologické pomery v Bratislave, t.j. pod povrchom terénu sa spravidla vyskytujú kvartérne štrkovité zeminy (triedy G1 až G3) a v podloží štrkov neogénne ílovité zeminy (triedy F6 až F8).

Použité homogénne modely podložia sú znázornené na obrázku 3. Prvý model podložia (MP1) je tvorený štrkmi triedy G1 až G3. Druhý model podložia (MP2) je tvorený ílovitou zeminou triedy F6 až F8.



a)



b)

Legenda:
B_i - šírka základovej dosky
H_A - hĺbka deformačnej zóny
h_1 - hrúbka štrkovitej zeminy (triedy G1 až G3) pod základovou škárou
h_2 - hrúbka ílovitej zeminy (triedy F6 až F8) pod základovou škárou

Obrázok 3: Analyzované homogénne modely podložia
a) Podložie tvorené štrkmi triedy G1 až G3; b) Podložie tvorené ílmi triedy F6 až F8.

Pre homogénne podložie bolo uvažované v geotechnických výpočtoch s vlastnosťami zemín uvedenými v tabuľke 1, ktorých hodnoty sú určené na základe uplatnenia porovnateľnej skúsenosti z lokality Bratislavy. Pre posúdenie základovej konštrukcie sú rozhodujúce pevnostné vlastnosti pre MSÚ (φ, c) a deformačné vlastnosti (E_{def}, E_{oed}) pre MSP [7].

Tabuľka 1: Vlastnosti zemín použité v geotechnických výpočtoch.

Poradové číslo	Názov a trieda zeminy	Objemová tiaž v prirodzenom uložení	Poissonovo číslo	Súčiniteľ	Oedometrický modul deformácie	Modul deformácie	Šmyková pevnosť (efektívna)	
		γ	ν	β	E_{oed}	E_{def}	φ_{ef}	c_{ef}
		[kN.m^{-3}]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[°]	[kPa]
1	Štrk triedy G1 až G3, stredne uľahnutý (kvartér)	20.0	0.20	0.90	166.7	150.0	35.0	0.0
2	Íl triedy F6 až F8, pevný (neogén)	21.0	0.42	0.37	40.5	15.0	20.0	30.0

2.3 Statické okrajové podmienky

Významný vplyv na posúdenie základovej konštrukcie na MSÚ a MSP má aj veľkosť zaťaženia, resp. veľkosť kontaktného napätia v základovej škáre. Vo výpočtoch bolo uvažované s piatimi rôznymi intenzitami zvislého zaťaženia, ktoré reprezentujú zaťaženie od 10-podlažnej až po 50-podlažnú budovu. Veľkosti zaťažení pôsobiace na základovú škáru sú uvedené v tabuľke 2.

Súčasná výstavba v Bratislave je výrazne charakterizovaná výškovými objektmi. Bežná výstavba výškových budov sa realizuje v rozsahu približne 10 až 30 podlaží, pričom v súčasnosti najvyššou dokončenou budovou v Bratislave je Eurovea Tower so 46 podlažiami. Keďže sa predpokladá ďalší rozvoj tohto typu výstavby, vo výpočtoch sa uvažovalo aj s budovami s 50 podlažiami.

Tabuľka 2: Veľkosť zaťaženia v závislosti od podlažnosti budovy.

Podlažnosť:	Šírka základu	Dĺžka základu	Veľkosť zaťaženia	Kontaktné napätie
n [-]	B [m]	L [m]	F_i [kN]	$\sigma_{d,i}$ [kPa]
10 podlaží	2	2	48 000	12000
	5	5		1920
	10	10		480
	20	20		120
	30	30		53,3
	40	40		30
	50	50		19,2
20 podlaží	2	2	88 000	22000
	5	5		3520
	10	10		880
	20	20		220
	30	30		97,8
	40	40		55
	50	50		35,2
30 podlaží	2	2	128 000	32000
	5	5		5120
	10	10		1280
	20	20		320
	30	30		142,2
	40	40		80
	50	50		51,2
40 podlaží	2	2	168 000	42000
	5	5		6720
	10	10		1680
	20	20		420
	30	30		186,7
	40	40		105
	50	50		67,2
50 podlaží	2	2	208 000	52000
	5	5		8320
	10	10		2080
	20	20		520
	30	30		231,1
	40	40		130
	50	50		83,2

3. Použité výpočtové metódy a programy

Geotechnické výpočty boli realizované formou parametrickej štúdie s rôznymi hodnotami šírky základu, rôznou veľkosťou zaťaženia a pre dva homogénne modely podložia.

Geotechnické výpočty a posúdenia boli realizované podľa metodiky výpočtu v zmysle STN 73 1001 [8] s využitím výpočtového programu GEO 5 (modul Pätka), v ktorom boli vypočítané hodnoty kontaktného napätia (σ_d) pre posúdenie medzného stavu používateľnosti a zvislej únosnosti (R_d) pre posúdenie medzného stavu únosnosti.

4. Zhodnotenie výsledkov

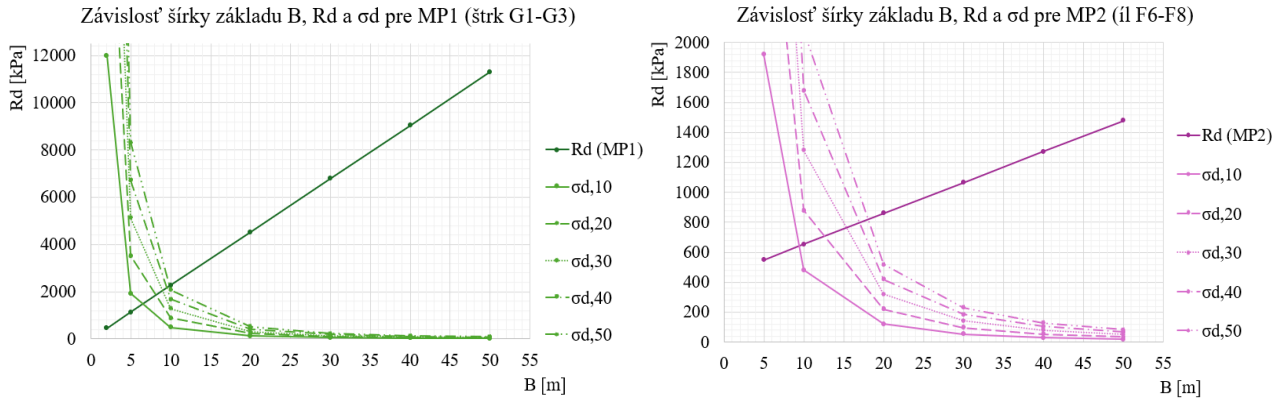
Na obrázku 4a,b a 5 sú graficky zobrazené vypočítaných hodnôt $R_{d,i}$ a $\sigma_{d,i}$ v závislosti od šírky základu B_i a intenzity zaťaženia F_i pre modely podložia MP1 (štrk G1-G3) a MP2 (íl F6-F8). Z grafických zobrazení je zrejmá funkčná závislosť šírky základu, vlastností zemín (modelu podložia) a intenzity zaťaženia na vypočítaných hodnotách napätí rozhodujúcich pre posúdenia na MSÚ ($R_{d,i}$) a MSP ($\sigma_{d,i}$). Z priesečníka hodnôt R_d a σ_d je možné vyjadriť "hraničnú" hodnotu šírky základu b_s, pri ktorej je rozhodujúce kritériu posúdenia na MSÚ alebo MSP. Šírka základu b_s je funkčne závislá aj od intenzity zaťaženia F_i. V tabuľke 3 sú uvedené vypočítané hodnoty šírky b_s pre dve charakteristické geotechnické prostredia v oblasti Bratislavy - únosné štrkovité podložie (MP1) a pre menej únosné ílovité podložie (MP2). Hodnoty boli stanovené pre rôzny počet podlaží budovy (intenzitu zaťaženia Fi), čo zodpovedá rôznym úrovniam zvislého kontaktného napätia pôsobiaceho na základovú škáru.

Na základe realizovanej parametrickej analýzy je možné formulovať nasledujúce závery:

a) Medzný stav únosnosti (MSÚ) je závislý od efektívnych pevnostných charakteristík (uhol vnútorného trenia φ a súdržnosť c) a šírky základu. S narastajúcou šírkou základu sa priamo úmerne zvyšuje aj zvislá únosnosť. MSÚ je nezávislé od veľkosti pôsobiaceho zaťaženia. Uvedené poznatky sú v súlade s normovým postupom uvedeným v [8].

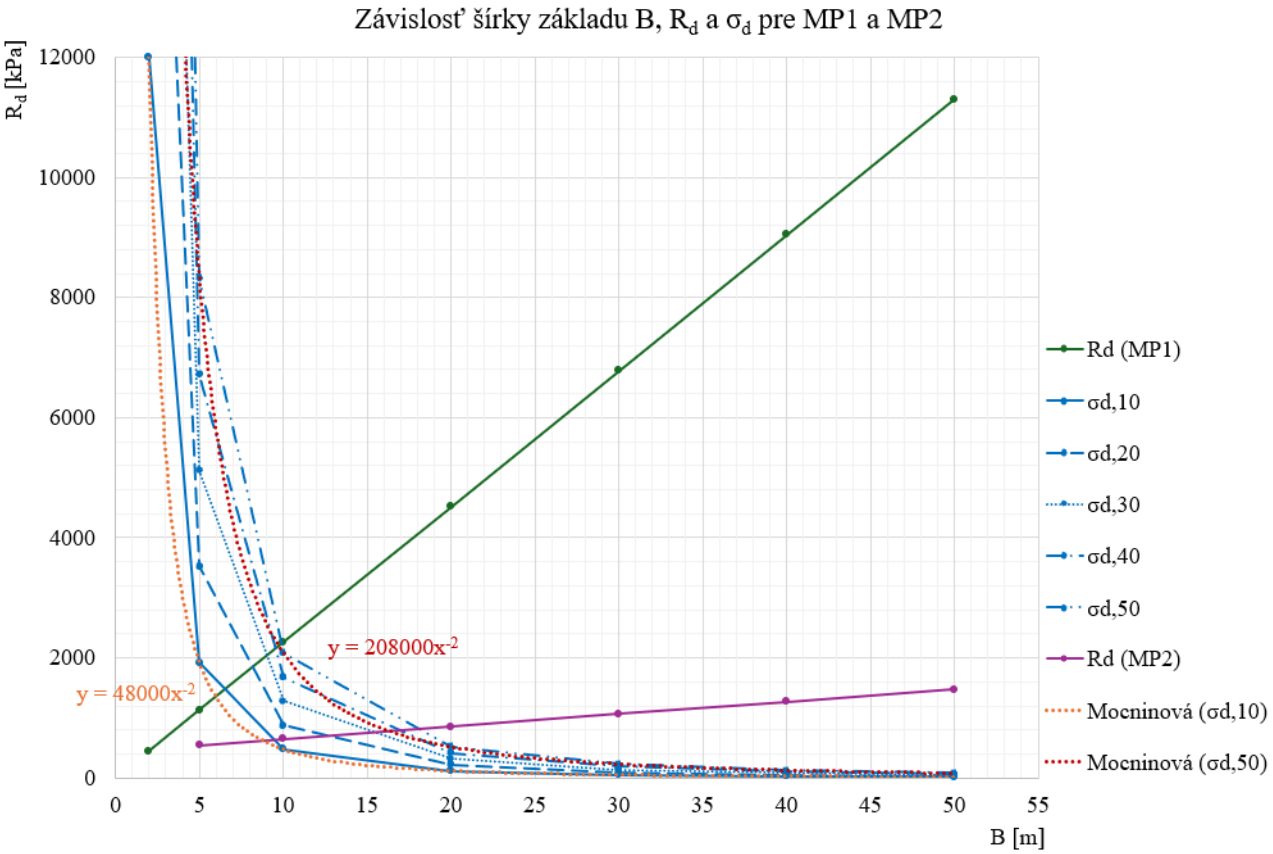
b) Výpočtami bolo preukázané, že pri širokých základoch (so šírkou základu viac ako hodnota b_s) je rozhodujúcim medzným stavom MSP. Tento poznatok je významný hlavne pri plošnom zakladaní výškových objektov.

c) Výsledná šírka b_s závisí od intenzity zaťaženia a od pevnostných charakteristík (φ, c) horninového prostredia. Pre štrkové podložie (MP1) je hodnota b_s od 6,5 do približne 10 m, čo je znázornené na obrázku 4a a konkrétne hodnoty b_s sú uvedené v tabuľke 3. Pre ílovité podložie (MP2) sa šírka b_s rovná približne 9,5 až 18 m, v závislosti od veľkosti zaťaženia pôsobiaceho na základ, zobrazené na obrázku 4b, konkrétne hodnoty b_s sú uvedené v tabuľke 3.



a) b)

Obrázok 4: Závislosť šírky základu B, R_d a σ_d
a) Pre MP1 (štrk G1-G3); b) Pre MP2 (íl F6-F8).



Obrázok 5: Závislosť šírky základu B, R_d a σ_d pre MP1 (štrk G1-G3) a MP2 (íl F6-F8).

Tabuľka 3: Vypočítané hodnoty šírky b_s pre MP1(štrk G1-G3) a MP2 (íl F6-F8) pri rôznej podlažnosti budov (intenzite zaťaženia).

	Šírka b_s	
Podlažnosť	MP1 (štrk G1-G3)	MP2 (íl F6-F8)
10 podlaží	6,54 m	9,44 m
20 podlaží	8,17 m	12,62 m
30 podlaží	9,01 m	15,37 m
40 podlaží	9,53 m	17,00 m
50 podlaží	9,88 m	18,08 m

Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že pri návrhu základových konštrukcií (dosiek) výškových budov je potrebné sa zamerať na posúdenie medzného stavu používateľnosti (MSP), ktorý spravidla predstavuje limitujúci faktor pri návrhu. Výpočtami boli overené a preukázané postupy a princípy vychádzajúce z platných noriem, pričom sa potvrdilo, že pri spomínanom type základových konštrukcií spravidla nedochádza prekročeniu MSÚ, ale k nadmernému sadaniu a nerovnomernému sadaniu, ktoré môže negatívne ovplyvniť používateľnosť a celkovú spoľahlivosť (stabilitu, používateľnosť a trvanlivosť) celej stavebnej konštrukcie. Tento problém je obzvlášť výrazný pri málo únosných ílovitých zeminách, kde v dôsledku ich veľkej stlačiteľnosti často dochádza k prekročeniu limitných hodnôt celkového konečného a nerovnomerného sadnutia.

Získané poznatky z prezentovanej parametrickej štúdie preukázali význam analyzovaných faktorov a podporujú potrebu pokračovania vo výskume a analyzovať ďalšie faktory ovplyvňujúce medzný stav používateľnosti s cieľom optimalizovať návrh základových konštrukcií výškových objektov.

5. Záver

Pri návrhu základových konštrukcií výškových budov, ktorých výstavba sa v posledných rokoch extenzívne rozvíja, je nevyhnutné zabezpečiť nielen splnenie medzného stavu únosnosti (MSÚ), ale aj medzného stavu používateľnosti (MSP). Práve posúdenie MSP je rozhodujúce, keďže pri ohybných plošných základoch výškových budov dochádza spravidla k prekročeniu limitných hodnôt konečného a nerovnomerného sadnutia a nie k prekročeniu únosnosti podložia. Pre zabezpečenie celkovej spoľahlivosti založenia ohybných základových konštrukcií výškových budov je potrebné podrobnejšie a komplexnejšie analyzovať posúdenie na MSP.

Výsledky geotechnických výpočtov preukázali správnosť uplatnených postupov a potvrdili význam dôsledného posúdenia medzného stavu používateľnosti pri návrhu základových konštrukcií (dosiek) výškových objektov. Z tohto dôvodu je pri návrhu základových konštrukcií nevyhnutné komplexne zohľadniť všetky relevantné faktory, ktoré ovplyvňujú geotechnický návrh základových konštrukcií. Komplexná analýza umožňuje optimálne (t.j. spoľahlivo a hospodárne) navrhnúť základovú konštrukciu, ktorá spĺňa normové požiadavky a zároveň poskytuje hospodárne riešenie. Z uvedených dôvodov je vhodné pokračovať v ďalšom výskume tejto problematiky a rozvíjať metódy, ktoré prispejú k optimálnemu návrhu plošných základov výškových budov.

Literatúra

[1] DAS, B. M.: *Principles of foundation engineering*. 7. edition. United states of America: Cengage Learning, 2011, 816 s. ISBN-13: 978-0-495-66810-7
[2] HULLA, J. – VRÁBEL, B. – BRČEK, M.: Niektoré problémy zakladania vysokých budov v Bratislave. In: *Zborník 16. Slovenskej geotechnickej konferencie*. Bratislava: Spektrum STU, 2025, s. 55 – 68. ISBN: 978-80-227-5505-4.
[3] ZHOU, Y.: Geotechnical engineering: Shallow foundations. Course No. G09-002, 9 PDH. In: *Soils and foundations. Reference manual – Volume II*. New York: CED-Engineering, 2006, s. 78.
[4] BAŽANT, Z.: *Metody zakládání staveb*. 2.vydanie. Praha: Academia, 1973, 652 s.
[5] ORR, T. L. L. – FARRELL, E. R.: Use of serviceability limit state calculations in geotechnical design. In: *Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Dublin: ISSMGE, 2001, s. 821 – 824.
[6] KATZENBACH, R. – LEPPLA, S. – CHOUDHURY, D.: *Foundation systems for high-rise structures*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2017, 293 s. ISBN 978-1-4987-4477-5.
[7] STN 72 1001 *Klasifikácia zemín a skalných hornín*. Bratislava: SUTN, 2010. 20 s.
[8] STN 73 1001 *Geotechnické konštrukcie. Zakladanie stavieb*. Bratislava: SUTN, 2010. 40 s.

Asad Zia[1]
Študijný program: D-TKeIS4 Theory and Structures of Civil Engineering Works

EFFECTIVENESS OF TIRE-SOURCED FIBERS IN RC MEMBERS: STEEL REDUCTION AND BEHAVIOR IMPROVEMENT

Abstract
Tire-sourced fibers (TSFs) have shown potential to enhance plain concrete, yet their role in reinforced concrete (RC) members remains insufficiently explored. This pilot study, part of a broader research program, examines a hybrid fiber (HF) mix of 60% TSFs and 40% hook-end commercial steel fibers (CFs) in RC bending members. Beams with equal reinforcement ratios were cast and tested alongside fiber-free controls. The program assessed compressive strength, load capacity, and energy absorption. Results showed a 10% increase in compressive strength and up to 8% higher load-carrying capacity in fiber-reinforced beams. The findings suggest that hybrid fibers can partially substitute steel reinforcement. Overall, hybrid fiber offers a sustainable approach for enhancing RC structural performance.

Key Words
Tire-sourced fibers (TSFs); Hybrid fibers (HF); Reinforced concrete (RC) beams; Load-carrying capacity; Recycled materials.

1. Introduction

The reuse of tire-sourced steel fibers (TSFs) in construction has become an important research focus in recent years, attracting extensive attention due to its potential to reduce waste and enhance the mechanical performance of cement-based materials [1–6]. Researchers have investigated TSFs in multiple forms, ranging from cleaned and processed fibers [7] to raw, directly recovered fibers [8], and in both hybrid [1] and non-hybrid [9] applications. Despite these efforts, the adoption of locally sourced TSFs remains limited. Several factors contribute to this situation, including the scarcity of studies focused on regionally available TSFs, the lack of integration of such fibers into concrete mixes composed of local materials, and the absence of established industrial-scale production methods.

While the beneficial effects of TSFs are relatively well established in unreinforced concrete, particularly in terms of enhancing compressive, tensile, and flexural strengths [5,10], their application in reinforced concrete (RC) members remains underexplored [11]. This gap is particularly significant, as the presence of steel reinforcement already contributes to high load-carrying capacity, and the additional role of fibers in improving cracking resistance, energy absorption, and post-peak behavior requires systematic evaluation.

From a sustainability perspective, the motivation to use TSFs is clear. For instance, in Slovakia, as in many other countries, no TSFs were utilized in the construction industry as of 2018 [12], despite increasing emphasis on recycling and sustainable construction practices. Given the well-documented bridging effect of steel fibers [13], which enhances crack control and toughness, integrating TSFs into RC members represents a promising opportunity for advancing both structural performance and sustainability.

[1] Asad Zia, ir., MSc., Department of Concrete Structures and Bridges, Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia

It is also important to recognize the evolution of TSFs. Early generations of raw tire-derived fibers were highly heterogeneous, often containing short and irregularly shaped pieces with limited efficiency in mechanical interlocking. More recent generations, however, include longer and more uniformly sized fibers [14], which are expected to provide superior performance compared with earlier raw forms. This technological progression opens new avenues for their effective use in structural-grade concrete.

Based on these considerations, the present study investigates the incorporation of TSFs in structural concrete. First, the compressive strength of TSF-reinforced concrete is assessed. More importantly, the study focuses on the behavior of RC beams with conventional reinforcement, comparing fiber-reinforced and non-fiber mixes. By addressing both material-level properties and structural performance, this study aims to clarify the role of TSFs in RC applications and contribute to the ongoing discussion on sustainable and robust construction practices.

2. Materials and testing procedure

The concrete used in this study was prepared with locally sourced aggregates. The one cubic meter mix consisted of 1010 kg of sand, 860 kg of coarse aggregate, 300 kg of cement (CEM I/B-S 42.5N), and 165 kg of water. A superplasticizer was incorporated at a dosage of 1.20 kg for the plain concrete and 1.80 kg for the fiber-reinforced mixes to ensure adequate workability. For the fiber-reinforced concrete, 40 kg of a hybrid fiber mix was added, comprising 24 kg of locally sourced tire-sourced steel fibers (TSFs) and 16 kg of industrial hook-end steel fibers with dimensions of 50 mm × 1 mm.

The mix design remained identical for both plain and fiber-reinforced concretes, with the only variations being the addition of fibers and the slightly higher superplasticizer dosage in the latter. Cylindrical specimens were prepared and tested for compressive strength in accordance with ASTM standards [15], ensuring consistent evaluation of material properties. For structural testing, RC beam specimens were cast and tested under flexure. Each beam was reinforced with two longitudinal steel bars of 10 mm diameter placed in the tension zone, with standard 90° bent hooks at the ends to ensure proper anchorage. The test setup for the RC beams is shown in Figure 1, providing a controlled framework for assessing the influence of hybrid fiber reinforcement on bending behavior.

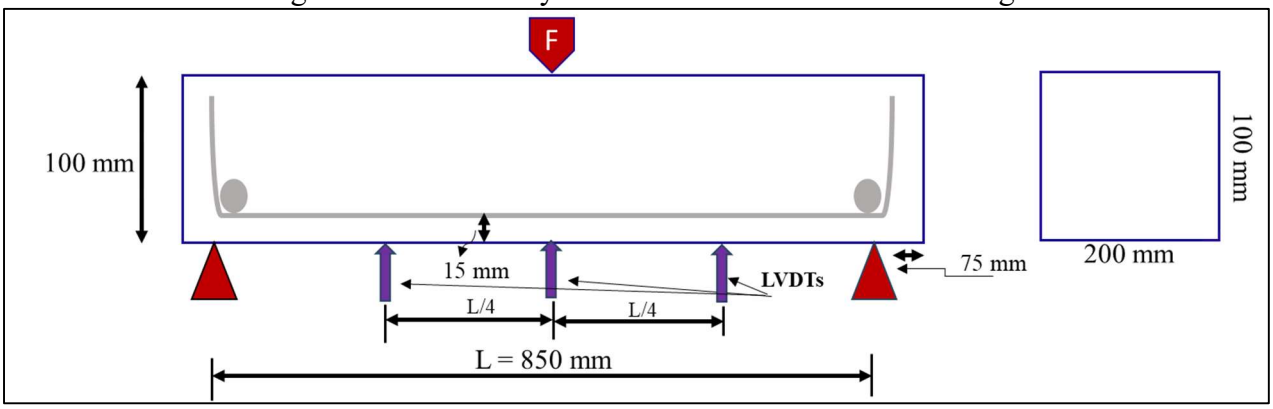


Figure 1: Test setup for testing RC members

3. Outcomes and analysis

The mix design and proportions were kept identical for all concretes, with the only variation being the incorporation of fibers in the fiber-reinforced mixtures. Plain concrete (0FC) and hybrid fiber-reinforced concrete containing tire-sourced fibers (TFC) were evaluated and compared. Percent differences in the measured strength properties are reported to highlight the relative improvements due to fiber addition.

3.1 Cylindrical compressive strength

Three cylindrical specimens were tested for each mixture of non-fiber concrete (0FC) and hybrid tire-sourced fiber concrete (TFC). The results, presented in Figure 2, show a consistent improvement in compressive strength for the TFC specimens compared with the 0FC specimens. This improvement confirms the contribution of hybrid fibers in enhancing the material's load-bearing capacity.

The addition of TSFs, in combination with industrial hook-end steel fibers, appears to improve the micro-crack arresting mechanism within the concrete matrix. This hybrid action not only delays crack initiation but also contributes to better stress redistribution under compression, thereby increasing peak strength. From a structural perspective, this enhancement is significant because improved compressive behavior directly influences the pre-cracking energy absorption, overall resistance to service stresses, and long-term durability of RC members.

These findings emphasize that hybrid TSFs can serve as a viable addition to structural-grade concrete, where they help maintain strength reliability while contributing to sustainability by reusing waste-derived fibers.

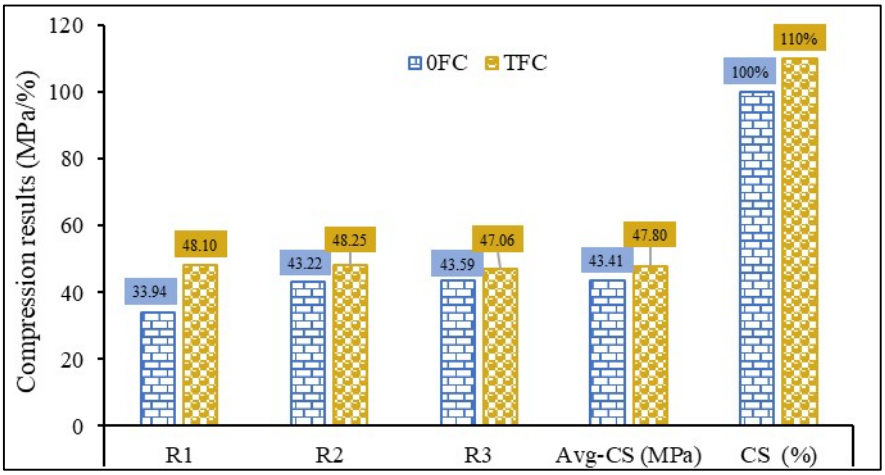


Figure 2: Cylindrical compressive strength results

3.2 Attributes of RC specimens

The flexural performance of reinforced concrete (RC) beams is illustrated in Figure 3. For energy evaluation, two indices were considered: post-cracking energy (PCE), defined as the area under the load–deflection curve from the post-peak region to ultimate load, and total cracking energy (TCE), defined as the total area under the curve from the onset of loading up to ultimate load. To enable fair comparison among specimens, the ultimate load level was kept constant for all cases during energy calculations.

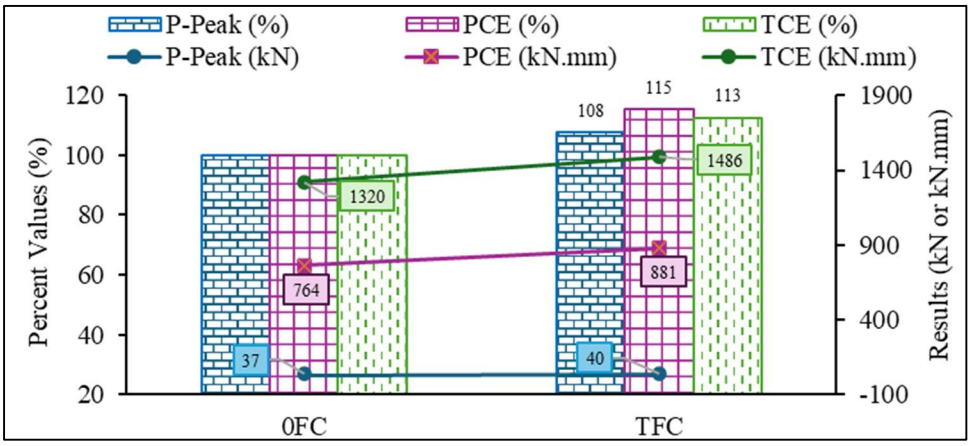


Figure 3: Results of reinforced concrete specimens

The results demonstrate that beams reinforced with hybrid TSFs achieved an 8% increase in peak load (P-Peak) compared with the non-fiber control beams (0FC). This improvement highlights the ability of the fibers to contribute directly to the flexural strength of RC members, even in the presence of conventional reinforcement. Moreover, hybrid fiber beams exhibited a 15% increase in PCE and a 13% increase in TCE relative to 0FC. These enhancements indicate that the hybrid fibers were fully engaged in resisting both pre-crack and post-crack deformations. Specifically, they contributed to

delaying crack initiation, restricting crack propagation, and significantly improving the overall energy absorption capacity of the beams.

The observed improvements suggest that the inclusion of hybrid TSFs can serve as a viable strategy to enhance the flexural performance and ductility of RC beams. Importantly, the 8% increase in peak load also points to the potential for a proportional reduction in conventional longitudinal reinforcement without compromising strength, thereby offering a pathway toward more sustainable and resource-efficient structural design.

3.3 Cracking pattern of RC specimens

The post-cracking behavior of the reinforced concrete (RC) beams is presented in Figure 4. The observed cracking patterns align well with the analytical attributes discussed in Section 3.2. For the plain concrete RC beams (0FC), failure was characterized by brittle behavior, severe spalling of the cover concrete, and complete loss of strength at mid-span (Figure 4a). The concrete in the critical region disintegrated into pieces, reflecting a sudden and damaging mode of failure.

In contrast, the hybrid tire fiber-reinforced beams exhibited a markedly different cracking response (Figure 4b). Cracks were more compactly distributed, and the beams demonstrated enhanced ductility with less visible damage. The presence of TSFs contributed to a pronounced fiber-bridging effect, which limited crack opening, maintained structural integrity in the mid-span region, and preserved continuity of the concrete matrix even after visible cracking. This indicates that the fibers not only delayed crack initiation but also controlled crack widening, thereby reducing the severity of damage.

These findings confirm that hybrid TSFs play a significant role in improving both the strength and ductility of RC beams. Their influence is particularly critical in the post-crack stage, where increased toughness and gradual load redistribution can extend the structural response time before collapse. From a practical perspective, this delayed failure mechanism is vital in extreme loading scenarios, such as earthquakes, as it increases the available evacuation time for occupants and enhances the overall resilience of structures.

(a) Plain concrete RC specimens

(b) Tire fiber RC specimens

Figure 4: Damage patterns of RC beam specimens after testing

4. Summary and future directions

This study investigated the use of hybrid tire-sourced fibers (TSFs) in structural-grade concrete, with a particular focus on compressive strength and the flexural behavior of reinforced concrete (RC) beams. Based on the experimental findings, the following conclusions can be drawn:

- The hybrid fiber mix (60% tire-sourced fibers and 40% industrial hook-end fibers) improved compressive strength by about 10% compared with non-fiber concrete.
- RC beams with hybrid fibers achieved an 8% increase in peak load, confirming the contribution of fibers to flexural strength even in the presence of conventional reinforcement.
- Energy absorption improved significantly, with 15% higher post-cracking energy (PCE) and 13% higher total cracking energy (TCE), demonstrating enhanced ductility and toughness.
- Cracking in fiber-reinforced beams was compact and ductile, while plain concrete beams failed in a brittle and damaging manner, showing the clear effectiveness of fiber bridging action.
- The results confirm that recycled TSFs can serve as a sustainable option to improve structural performance while potentially reducing the demand for conventional steel reinforcement.
- Further research should optimize fiber dosage and hybrid ratios, evaluate long-term durability, and assess large-scale applications to strengthen the case for TSFs in sustainable structural design.

Acknowledgment

This work was supported by the Scientific Grant Agency of the Slovak Republic (VEGA1/0358/23), the Interreg CENTRAL EUROPE Programme (CE0100390 – ReBuilt), and Slovak R&D projects APVV-23-0193 and APVV-23-0383.

References

[1] A. Zia, P. Zhang, I. Holly, Effectiveness of hybrid discarded tire/Industrial steel fibers for improving the sustainability of concrete structures, Constr Build Mater 378 (2023) 131226. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131226.

[2] A.M. Tahwia, A. Noshi, M. Abdellatief, M.H. Matthana, Experimental investigation of rubberized concrete slab-on-grade containing tire-recycled steel fibers, Innovative Infrastructure Solutions 9 (2024) 46. https://doi.org/10.1007/s41062-023-01354-9.

[3] I.G. Shaaban, J.P. Rizzuto, A. El-Nemr, L. Bohan, H. Ahmed, H. Tindyebwa, Mechanical Properties and Air Permeability of Concrete Containing Waste Tires Extracts, Journal of Materials in Civil Engineering 33 (2021). https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003588.

[4] C.G. Papakonstantinou, M.J. Tobolski, Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete, Cem Concr Res 36 (2006). https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.015.

[5] A. Zia, P. Zhang, I. Holly, Experimental investigation of raw steel fibers derived from waste tires for sustainable concrete, Constr Build Mater 368 (2023) 130410. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130410.

[6] J. Prokop, A. Zia, I. Holly, A. Ondak, Assessing the impact of tire steel fibers on concrete's fracture behavior, cracking resistance, and durability performance, Materialia (Oxf) 44 (2025) 102539. https://doi.org/10.1016/J.MTLA.2025.102539.

[7] A. Alsaif, Y.M. Abbas, Mechanical and durability enhancements of lightweight fiber-reinforced cementitious composites via integration of recycled tire and industrial steel fibers, Journal of Building Engineering 111 (2025) 113420. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113420.

[8] G. Centonze, M. Leone, M.A. Aiello, Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization, Constr Build Mater 36 (2012). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.088.

[9] A. Zia, I. Holly, P. Zhang, Constitutive modeling and extended performance evaluation of concrete reinforced with non-hybrid waste tire steel fibers, Journal of Building Engineering 96 (2024) 110522. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110522.

[10] D. Revuelta, P. Carballosa, J.L. García Calvo, F. Pedrosa, Residual strength and drying behavior of concrete reinforced with recycled steel fiber from tires, Materials 14 (2021). https://doi.org/10.3390/ma14206111.

[11] M. Bartolac, D. Damjanovic, J. Krolo, A. Baricevic, Punching Shear Strength of Concrete Slabs Reinforced With Recycled Steel Fibres From Waste Tires, 2016.
[12] ETRMA, ELT-Management-Figures-2017-vf, 2019. https://www.etrma.org/wp-content/uploads/2019/11/ELT-Management-Figures-2017-vf.xlsx.pdf (accessed April 19, 2022).
[13] CNR-DT 204/2006, Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures, Rome, 2006. https://www.cnr.it/en/node/2640 (accessed September 20, 2024).
[14] A. Zia, I. Holly, Mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete with end-of-life tire steel fibers: Short-term, prolonged, and rigid pavement implications, Constr Build Mater 491 (2025) 142797. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142797.
[15] ASTM C39/C39M-16, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2016. https://www.astm.org/c0039_c0039m-21.html (accessed October 12, 2023).

WATER RESOURCES ENGINEERING

***Ing. Raghad Awad*[1]**
Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo ,3. ročník

HYDRODYNAMICKÁ SIMULÁCIA VYPLYVU KLIMATICKEJ ZMENY NA MESTSKÉ ODVODŇOVACIE SYSTÉMY

HYDRODYNAMIC SIMULATION OF CLIMATE CHANGE EFFECTS ON URBAN DRAINAGE SYSTEM

Abstract
This study evaluates the effects of climate change on an urban sewer network through hydrodynamic simulations using MIKE software. Increased impervious surfaces in cities intensify stormwater runoff, heightening the risk of drainage system overload during extreme rainfall events. Four rainfall scenarios were modeled, including baseline and 60% intensified events derived using the Siffald and isochron methods. The simulations indicate that while the existing network adequately manages typical rainfall, higher-intensity events result in localized flooding, particularly in smaller street drains and near Pumping Station CS2. To improve the system resilience, the study recommends targeted grey infrastructure improvements such as including enlarging key pipe sections and upgrading the CS2 pump to a capacity of 0.11 m³/s and integrating green infrastructure measures thereby improving hydraulic performance, reducing runoff and increase adaptability to future climatic conditions

Kľúčové slová / Key Words
Climate change, Urban drainage, Hydrodynamic modeling, flood resilience, sewer network

1. Introduction

Climate change represents one of the most significant environmental challenges of the 21st century, with far-reaching effects on urban areas. Rising temperatures, changing precipitation patterns, and more frequent extreme weather events exacerbate existing urban issues , intensifying heat islands, increasing flood risk, and straining aging drainage and sewer infrastructure [1]. Urbanization further amplifies these challenges. Expanding impervious surfaces such as roads, rooftops, and pavements disrupt natural hydrological cycles by accelerating runoff and reducing infiltration. The result is rapid surface flow that elevates water levels in retention structures, increases erosion and sediment deposition, and heightens the risk of flooding [2]. Runoff also transports pollutants, sediments, nutrients, and heavy metals into receiving waters, degrading aquatic ecosystems and urban water quality [3]. To mitigate these effects, modern cities are increasingly turning toward sustainable stormwater management solutions. Green infrastructure approaches such as green roofs, permeable pavements, bio-retention basins help slow runoff, promote infiltration, and increase ecological performance [4]. These systems not only reduce the burden on sewer networks but also mitigate heat island effects, improve water quality, support biodiversity, and increase urban resilience to extreme rainfall and future climate variability [5].

[1] Raghad Awad, Ing., Stavebná fakulta , Radlinského 2766/11 , 811 05 Bratislava

These urban water challenges are further complicated by climate change. According to the World Meteorological Organization (WMO), climate is defined as a long-term, at least 30-year, weather regime. Climate change refers to shifts in climatic conditions caused primarily by increased greenhouse gas emissions from human activities, distinguishable from natural variability. Rising temperatures and altered precipitation patterns can intensify urban heat islands, increase flooding risk during extreme rainfall events, and strain urban infrastructure[6].While some impacts, such as an extended growing season, may be beneficial, negative effects include higher energy demand, increased air conditioning costs, elevated emissions of pollutants and greenhouse gases, reduced human comfort, and a higher incidence of heat-related illnesses and water quality deterioration Therefore , this study aims to assess the impact of climate change on urban environment with particular focus on combined sewer networks, specifically in the a study area located in slovakia for the year 2025.

2. Methodology

2.1 Study Area

To examine these dynamics at a local scale, this study focuses on the town of Vráble, located in the northern part of the Danubian Lowland in Nitra District (Figure 1)(Mapy.com, n.d). The town has a population of 9,381 and covers an area of 3,829 hectares, with a built-up area of 402 hectares. Four rivers flow through the town: Žitava, Telinský Potok, Širočina, and Hosťovský Potok. The Vráble Reservoir is located nearby, and Dyčanské Lake lies in the direction of Nitra .The drinking water supply for Vráble–Dyčka–Horný Ohaj is provided by a DN 700 transmission pipeline along the Gabčíkovo–Nové Zámky–Vráble route, passing through the Dyčka Reservoir (2 × 10,000 m^3). The town is connected to the reservoir via a DN 500 supply pipeline, and from the Dyčka Reservoir, a DN 500 transmission pipeline extends to Zlaté Moravce, supplying the villages along the water main route. Within the town, a water distribution network with DN 100, 150, and 200 pipelines has been constructed, totaling approximately 45.1 km . In 2012, the existing sewer network was extended to the Dyčka district, and in June 2014, the sewer system in the Horný Ohaj district was completed, allowing all residents to connect to the wastewater system. Due to its location, the town falls under the West Slovak Water Company [7].The Vráble wastewater treatment plant, located south of the town and discharging into the Žitava River, is a mechanical-biological facility equipped with sludge management systems Its current capacity and operational parameters are adequate to support ongoing residential development and the expansion of industrial activities within the town. However, should nearby municipalities be connected to the treatment plant in the future, an upgrade or intensification of the facility would be required to accommodate the increased wastewater load [8]. The town's sewer network is designed to manage varying topography and includes two operational overflow chambers and four pumping stations that transport wastewater from lower-lying areas to higher elevations, ensuring consistent flow and minimizing the risk of local flooding or system overload .This study aims to assess the impact of climate change on urban environment with particular focus on combined sewer networks, specifically in the town of Vráble in the year of 2025.

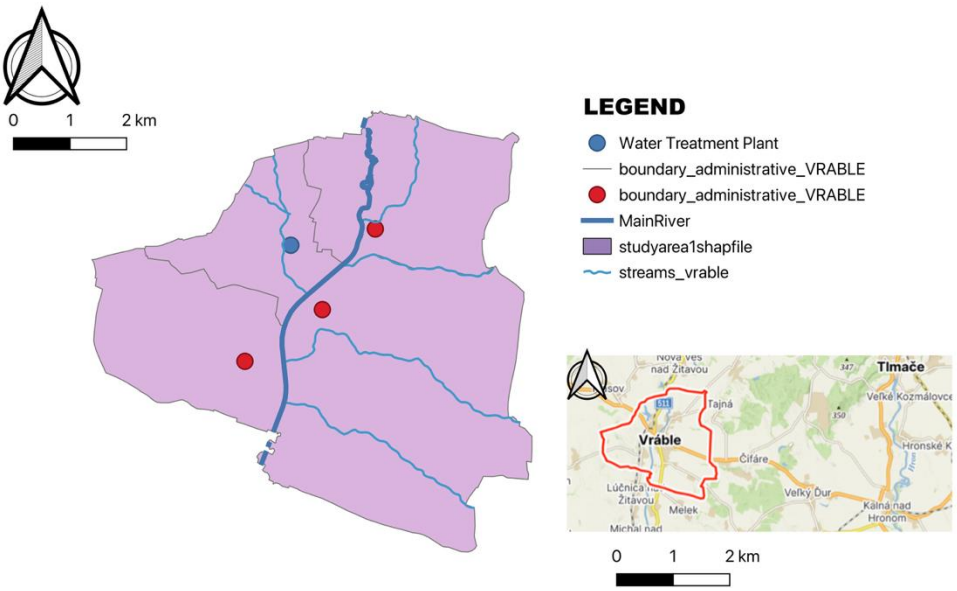


Figure 1: the study area of Vráble is shown, highlighting the main rivers and streams within the region.

2.2 Simulation

The Mouse CS consists of various elements of the model , nodes (manholes , tanks and outlets from the system) , lines (pipes of circular ,egg-shaped or rectangular profile) and other elements (CSO relief chambers, pumping stations ,valves , various openings and flow controllers). There are three models for calculating surface runoff within CS ,namely Model A, the Time and Area Method,which works on the basis of Isochron method , there is Model B , the Non-Linear Reservoir Method , which is actually a kinematic wave method , and finally there is Model C ,the linear Reservoir Method . The first method used in this research was the isochron method , the catchment is divided into smaller parts by isochrones . I.e. lines connecting points with the same inflow time to a given shaft . This method neglects water retention in the catchment. This method is used on a catchment where no surface runoff data are known , only runoff coefficients are known.
Regarding hydrological parameters they were not changed in the model, the default values were left at all points. Initial losses, including surface water balancing and surface wetting, are considered with a value of 0.6 mm. Permanent losses, such as evaporation and infiltration, are assumed to be 0.9 mm. The spatiotemporal curve accounts for the shape of the catchment, with MOUSE recognizing three basic catchment shapes ; Rectangular catchment – TACurve 1 ,Expanding (divergent) catchment – TACurve 2 and Narrowing (convergent) catchment – TACurve 3. The current Vráble catchment is difficult to classify, as it expands in the upper part, narrows in the lower section, and then expands again. Therefore, it is considered a rectangular catchment, using TACurve 1 shown in Figure 2 [9].

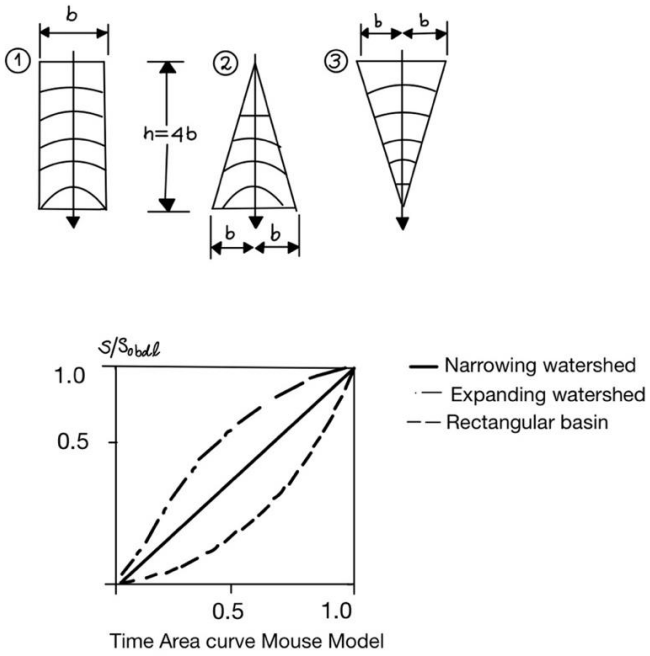


Figure 2: Adequate drainage area and its polygon boundary

The first step was obtaining a .dwg map of the given location, containing information about pipe materials, diameters, and lengths, as well as terrain elevations and manhole placement levels.The next step involved importing this map and all its associated data into ArcGIS, where the drawing was divided into two shapefile-format maps one containing manholes and their attributes, and the other containing pipes. Since the shapefile format is fully compatible with MIKE URBAN, the next step was importing this data into the modeling software using the Import/Export command. Once the map was uploaded into MIKE URBAN, the drainage area boundary was defined using a polygon, marking the region from which stormwater flows into the sewer network. The polygon does not enclose areas with no potential for stormwater inflow. In this study, two such areas were identified; A roadway connecting two city districts, alongside which a drainage ditch is present. A section of the sewer network in the southwestern part of the city, located directly beneath arable land, which is expected to absorb large volumes of water shown .Next, using the Catchment Delineation Wizard command, the catchment area was automatically divided into smaller sections based on manholes, ensuring that each section corresponds to exactly one manhole shown in Figure 3. The final step in this process was assigning each section to its respective manhole, establishing a connection between them using the Catchment Connection Wizard command. The polygon is divided based on manholes because these are the only points where stormwater inflow into the sewer network is considered.

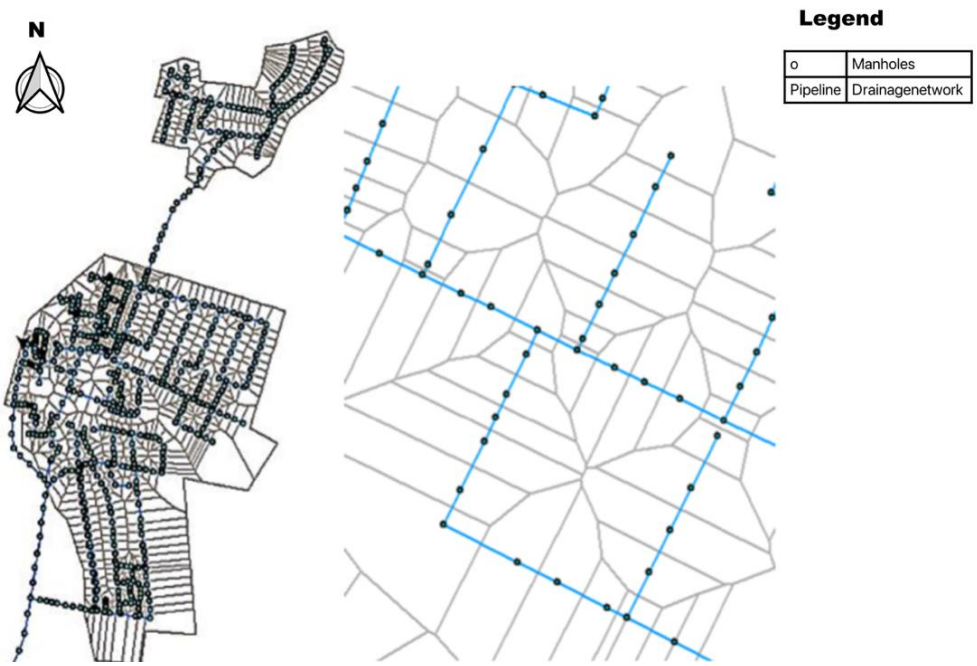


Figure 3: Adequate drainage area and its polygon boundary

The next step is setting the imperviousness of the area using the Catchment Processing function. Various shapefile layers can be loaded into the current map, with each layer representing a specific type of surface, such as roads, parking lots, or rooftops. The remaining areas, such as grass-covered surfaces, are assigned a different imperviousness percentage, meaning a different runoff coefficient.The city of Vráble has five main types of development ; Single-family houses with gardens in the Vráble area, Single-family houses in the northern district of Horný Oháj,Industrial areas of the city,Large buildings with minimal or no gardens (e.g., shopping centers, schools, etc.), and Densely built-up city center. I simplified the area by dividing it into three sections, each with a different runoff coefficient. The single-family housing area with gardens in Vráble, covering the entire southern part of the city marked in green in Figure 4. has a runoff coefficient of 0.2. The single-family housing area with gardens in Horný Oháj has a lower runoff coefficient of 0.05 due to the presence of drainage ditches along almost every street in this district, meaning that only minimal stormwater is expected to enter the sewer system. The third section includes all remaining built-up areas, with a runoff coefficient of 0.8, and is marked in orange in Figure 4. At this stage, the catchment shape and its corresponding T/A curve were also set. Due to the shape of the catchment, TACurve 1 was selected in figure 2.

The next step involved setting the rainfall boundary conditions using the Boundary Condition tool and the Catchment Load sub-tool. It was specified that the model would only consider rainfall, as this is the sole input in this rainfall-runoff model, and that the entire drainage area would be included rather than just a portion.

Finally, using the Boundary Items sub-tool, the design block rainfall was selected in two steps, followed by the synthetic block rainfall based on Šifalda in the next two steps in figure .

Rain 1: 15-minute block rain, with a periodicity of 0.5, and an intensity of 138.49 l/s·ha for the Nitra area shown in table 1.

Rain 2: 15-minute block rain, with a periodicity of 0.5, and an intensity increased by 60%, resulting in an intensity of 221.59 l/s·ha, according to the scenario from the Fifth National Report of the Slovak Republic on Climate Change (2009) for the western Slovakia region , shown in table 1. More recent climate projections from sources such as the IPCC AR6 report, CMIP6 models, and EURO-CORDEX

regional climate datasets also indicate a significant increase in extreme rainfall events consistent with or exceeding the 60% increase assumed here. These updated datasets support the validity of the selected climate scenario, reinforcing confidence in the rainfall intensities used for modelling future sewer system performance under climate change.

Rain 3: 15-minute Šifalda synthetic rain, with a periodicity of 0.5, and an intensity of 138.49 l/s·ha for the Nitra area

Rain 4: 15-minute Šifalda synthetic rain, with a periodicity of 0.5, and an intensity increased by 60%, resulting in an intensity of 221.59 l/s·ha. Each of these rainfall events was designed for 12 hours, covering the period from January 31, 2000, at 22:00 to February 1, 2000, at 10:00. Rain always starts on February 1, 2000, at midnight. The duration of each rainfall event is 15 minutes.

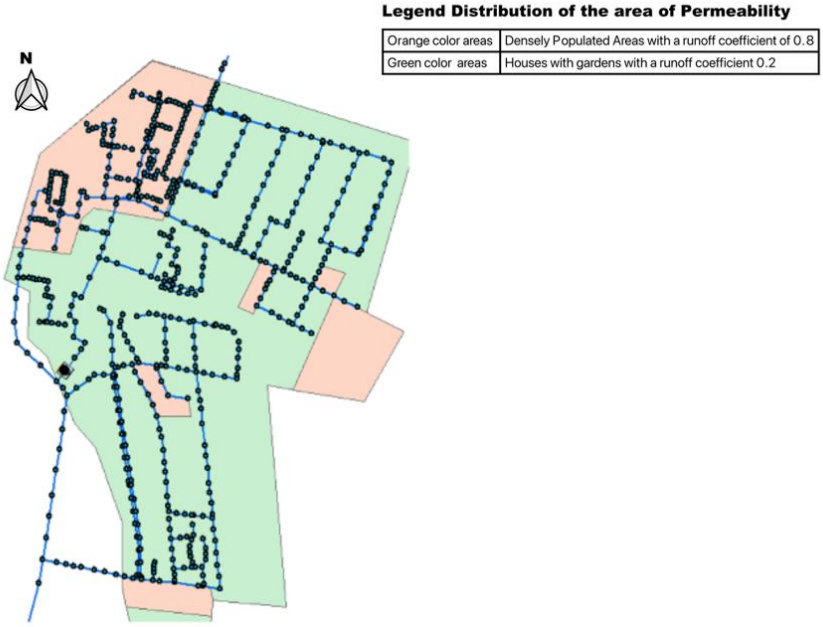


Figure 4: Distribution of the area by permeability: the orange color represents densely built-up areas with a runoff coefficient of 0.8, while the green color represents houses with gardens with a runoff coefficient of 0.2.

Table 1: values for calculation of Yield and Rainfall

P=0.5, t=15	K	B	a	Q14(l/s,ha)	Q15x1,6(l/s,ha)
	2252.7	4.35	0.915	138.493	221.589

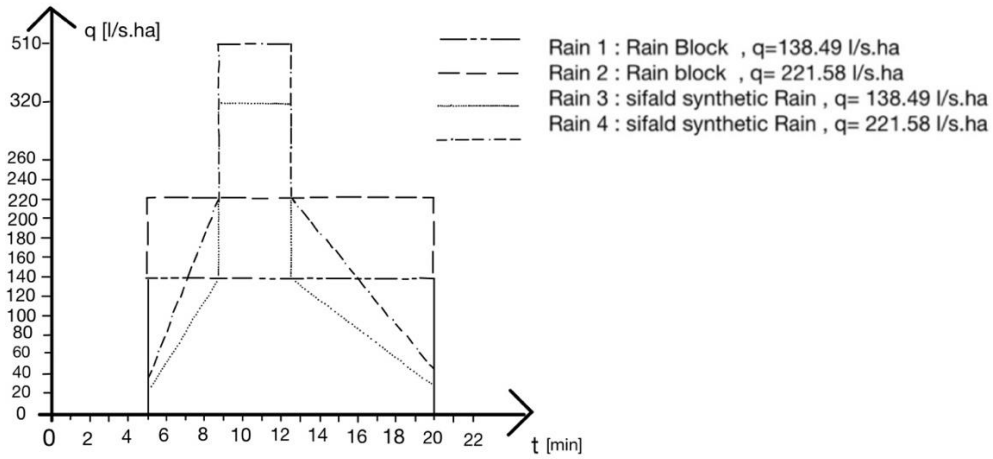


Figure 5: Rainfall yields 1 to 4 and their distribution over time

In sections where the DN was greater than 1 m, the manhole sizes were selected according to the pipe size to minimize local losses. The pipe material up to DN 400 is PVC, and from DN 600 onward, it is concrete.There are four pumping stations in ,with their switch-on and switch-off heights as well as flow rates listed in Table 2.

Table 2: Pumping, their switch-on and switch-off heights and preset flow rates in m^3s^-

Pumping Station	Switching Height (m above sea level)	Cut-off Height(m.a.s.l)	Flow Rate (m^3s^{-1})
CS1	142.00	141.65	0.1
CS2	138.05	137.80	0.07
CS3	141.20	140.90	0.05
CS4	140.50	140.27	0.1

After entering all the data, it was necessary to use the Check Tool, which verifies the entire project before running the simulation. The check results may include warnings and errors. Warnings indicate potential issues but do not significantly affect the simulation. Examples of warnings include negative pipe slope values or manhole diameters being smaller than pipe diameters.Errors, on the other hand, can include missing information about diameters, elevations, undefined pipe materials, or missing properties of pumping stations and overflow chambers [10]. After running the Check Tool and correcting any necessary elements, the simulation can proceed.Due to limited availability of historical rainfall and flow data for the Vráble sewer system, calibration and validation of the MIKE URBAN model against observed data were not feasible. Consequently, the simulation results should be interpreted considering this limitation. Model parameters were selected based on design documentation and expert judgment to represent realistic system behaviour. Future studies would benefit from field data collection to enable model calibration and improve prediction reliability.

3. Results and Discussion

In the study of Vráble's sewer network, simulations were conducted using the Run MOUSE tool in MIKE URBAN, with a focus on assessing the system's capacity under different rainfall scenarios. Four simulations were performed two using block rainfall models and two using synthetic Šifalda rainfall models. Each simulation involved two key phases: the surface runoff simulation, tailored to a specific rainfall input, and the hydraulic simulation within the sewer network based on that runoff . The first simulation, using Rain 1 (a 15-minute block rainfall with an intensity of 138.493 l/s·ha), revealed no flooding, confirming that the current system can

manage baseline rainfall effectively. However, the second simulation with Rain 2 (intensity increased by 60% to 221.584 l/s·ha) identified several critical areas prone to flooding, especially in the upper sections of the network before node 181, where the system becomes hydraulically overloaded. Longitudinal profile analysis showed rising water levels in initial manholes and flooding near Pumping Station CS2, likely due to inadequate pump capacity or limited station storage . In total, 19 manholes flooded, and 38 had water levels within 0.5 m of the surface. The study underscores the need for infrastructure upgrades to address increased flooding risks from more intense rainfall due to climate change. Simulations with Rain 3 (138.49 l/s·ha) showed the network struggles with peak runoff, while Rain 4 (221.59 l/s·ha) caused flooding at up to 75 manholes a 2.53% increase over Rain 2. These results reveal limited system capacity under extreme conditions. A total of 19 out of 712 manholes experienced flooding, while in 38 manholes, water levels during the simulation were only 0.5 m below the surface indictaed in Figure 6 . These values indicate that in the future, reconstruction of certain sections of the sewer network will likely be necessary to protect it from potential overloading and flooding.

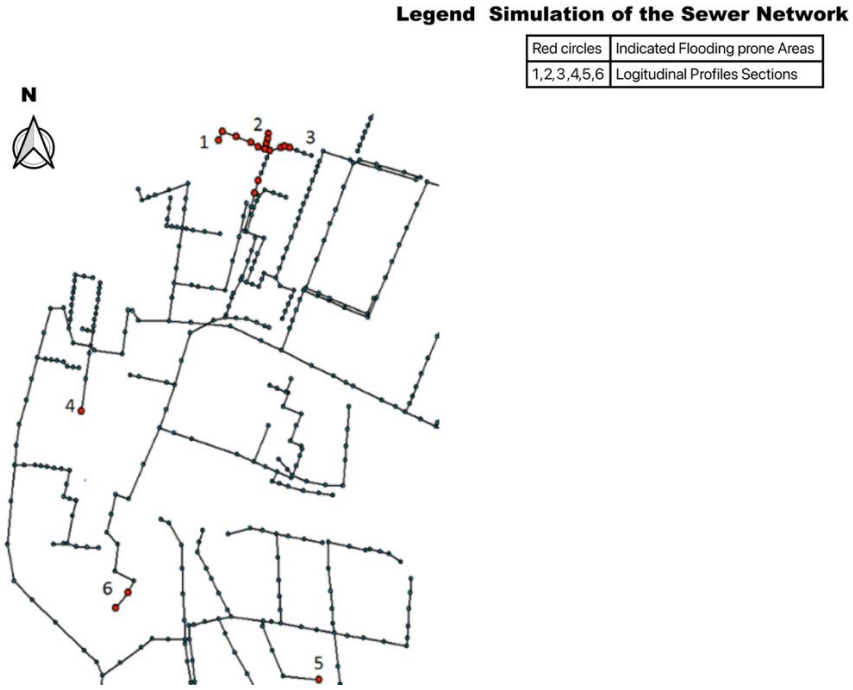


Figure 6: Identification of sewer network flooding locations using Rain 2. The numbers indicate the locations of the longitudinal profile drawing

MIKE played a crucial role in assessing Vráble's sewer system by offering high-resolution, data-driven insights into its performance under changing climate conditions. The reconstruction measures that are proposed only for the simulation of rainfall event number 2, i.e. rainfall with a periodicity of 0.5, as this is the rainfall for which the sewer network is normally designed. Reconstruction is proposed on the sections labelled number 1 through 6 from figure 8.1-1. In section 1,2,3 it is proposed to change the diameter of pipes 208 and 209 from DN 400 to DN 600, and also in pipes 13 and 14 to change the diameter of the pipes from DN 600 to DN 800. On section 4, it is proposed to change the diameter of pipes number 705 and 717 from DN 300 to DN 400. On Section 5, it is proposed to change the diameter of pipes number 559 and 560 from DN 300 to DN 400. On section 6 upstream of the CS2 Pumping station, the load on the sewer network will be reduced by using a more powerful pump capable of conveying a flow of 0.14 m^3/s instead of 0.07 m^3/s. To account for model uncertainties, sensitivity was partially addressed by applying varying runoff coefficients tailored to different terrain types, reflecting realistic surface conditions. Although a comprehensive sensitivity

analysis was not conducted, this approach captures how diverse land characteristics influence runoff predictions. Future work could expand on this by systematically exploring the effects of pump capacities and rainfall input distributions on flooding outcomes.

4. Conclusion

This paper was used to assess the sewer network for its current state, from real measured values, and to assess it in relation to the increased values that are likely to arise due to climate change. According to the selected scenario of the fifth national change report of the Slovak republic, the storm runoff is expected to increase up to 60% by 2075 for the territory of western Slovakia. Mike simulated 4 different rainfall events. The first two rains were block model rains with a yield of 138.49 l/s. ha and with a 60% increase in this yield. The second two rains are synthetic model rains according to shifaldo, which were derived based on the above block rains. From the results of the first simulation, the sewer network should be able to cope with a rain of this magnitude without any problems, completely without flood sections. In the results of the second, flooded areas are already appearing, especially in the initial sections of the smaller street drains, also in front of the pumping station number 2. The initial sections of the smaller street drains, also in front of the pumping station number 2. The initial sections of the smaller street drains are flooded before the lower part of the drainage network is overflowed, so it can be said that these small diameters are not sufficient for this volume of rain. The third simulation produced approximately the same results as simulation 2, ie. Flooding occurred in the early portions of the smaller street drains. The last simulation showed the most flooded area. To protect the sewer network from overloading and flooding part of the area, the sewer network will need to be reconstructed in the future. The proposal suggests, the reconstruction takes the form of increasing the diameter of the pipes in certain sections. These sections will lighten the sewer network but will also create storage space in the sewer network. The last section to be reconstructed is the part of the sewer network before the pump station CS2, in this section, the change of the pump is proposed so that this pump can convey 0.11 m^3 /s instead of 0.07 m^3/s.

Acknowledgmenet

This work was supported by the Scientific Grant Agency of the Ministry of Education, Youth and Sports of the Slovak Republic and the Slovak Academy of Sciences within the project VEGA 1/0682/23, co-funded by the Slovak Research and Development Agency (contract No. VV-MPV-24-0180). This was conducted using Mike software under a student license from the DHI Group.

5. References

[1] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION: *Climate* [online]. [n.d.] [cit. 27.10.2025]. Available at: https://wmo.int/topics/climate

[2] SEMADENI-DAVIES, A. – HERNEBRING, C. – SVENSSON, G. – GUSTAFSSON, L.-G.: The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: suburban stormwater. *Journal of Hydrology*. 2008, vol. 350, no. 1–2, pp. 1–12. Available at: http://www.vrable.sk/encyklopedicky.phtml?id3=4102

[3] STALTER, D. – MAGDEBURG, A. – QUEDNOW, K. – BOTZAT, A. – OEHLMANN, J.: Do contaminants originating from state-of-the-art treated wastewater impact the ecological quality of surface waters? *PLoS ONE*[online]. 2013, vol. 8, no. 4, e60616–60632 [cit. 27.10.2025]. Available at: https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0060616

[4] PACHOURI, R. – KUMAR, A. – MEHTA, P.: Revolutionizing urban water resilience: innovative approaches to stormwater management. *Science of the Total Environment*. 2025, vol. 733, pp. 139357–139368. Available at: https://www.researchgate.net/publication/395057046_Revolutionizing_Urban_Water_Resilience_Innovative_Strategies_and_Advancements_in_Sustainable_Urban_Drainage_Systems_SuDS

[5] CUCE, P. M. – JONES, R. – LI, F.: Mitigating urban heat islands through green infrastructure. *Sustainability* [online]. 2025, vol. 17, no. 3, pp. 1303–1315 [cit. 27.10.2025]. Available at: https://www.mdpi.com/2071-1050/17/3/1303

[6] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY: *Climate change impacts on health* [online]. [n.d.] [cit. 27.10.2025]. Available at: https://www.epa.gov/climateimpacts/climate-change-impacts-health

[7] ZSVS: *About the company: territorial competence* [online]. [n.d.] [cit. 27.10.2025]. Available at: https://www.zsvs.sk/o-nas/o-spolocnosti/posobnost

[8] TAVAKOL DAVANI, H.: How does climate change affect combined sewer overflow? An evaluation using rainfall runoff modeling. *Sustainable Cities and Society*. 2016, vol. 27, pp. 430–438. Available at: https://scholarcommons.sc.edu/eciv_facpub/47

[9] CADUS, J. – POETSCH, A.: Dynamic modelling of urban rainfall runoff and drainage: coupling DHI MIKE URBAN and MIKE FLOOD [online]. [n.d.] [cit. 27.10.2025]. Available at: https://www.geography.at/study/analysis/cadus_poetsch_seminar-paper.pdf

[10] GOGIEN, F. – MÜLLER, T. – SANCHEZ, L.: Assessing the impact of climate change on combined sewer systems. *Water Research*. 2023, (article in press), pp. 1–12. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004313542201449X

Jana Grečnárová[1]
Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, 4. ročník

EXPERIMENTÁLNE MERANIE RETENČNÉHO POTENCIÁLU VEGETAČNÝCH STRIECH

EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF THE RETENTION POTENTIAL OF VEGETATED ROOFS

Abstract
Vegetated roofs represent an effective measure for reducing rainwater runoff and improving the microclimate in urban environments. The aim of the research was to analyze the retention properties of experimental vegetated roofs under temperate climatic conditions. The experiment was conducted at the Slovak University of Technology in Bratislava from July 24 to 24 September 2025 on five modules with different layer compositions. During the monitored period, eleven rainfall events with uneven distribution were recorded. The retention potential of the modules ranged between 54 and 67%, with greater substrate depth and the presence of vegetation increasing water retention capacityThe addition of 10% biochar to the substrate has not yet demonstrated an increase in retention properties. The results confirm that the composition of layers, substrate depth, and vegetation significantly influence the retention behavior of vegetated roofs and contribute to sustainable rainwater management in urban areas.

Kľúčové slová / Key Words:
vegetačná strecha; retenčná schopnosť; substrát; odtok; experimentálny modul/ vegetation roof; retention capacity; substrate; drainage; experimental module

1. Úvod

V mestskom prostredí pomáhajú vegetačné strechy zadržiavať dažďovú vodu, zlepšovať mikroklímu a prispievať k čistejšiemu odtoku. Okrem environmentálneho prínosu znižujú aj zaťaženie kanalizačných sietí a podporujú prirodzený kolobeh vody v mestách. Ich účinnosť však závisí od viacerých faktorov, predovšetkým od typu konštrukcie, výšky a zloženia substrátu, druhu vegetácie a miestnych klimatických podmienok. Praktické skúsenosti z rôznych klimatických oblastí potvrdzujú, že funkčnosť vegetačných striech sa môže výrazne líšiť. Podľa rozsiahleho prehľadu zahraničných štúdií realizovaných v 21 krajinách vegetačné strechy zadržiavajú približne 40 až 60 % ročných zrážok, pričom hodnoty závisia od typu konštrukcie a lokálnej klímy [1]. Podobné výsledky potvrdila aj štúdia Sims a kol., ktorá namerala retenciu v rozmedzí 34 až 69 % v závislosti od typu vegetačnej strechy [2]. V rozsiahlej štúdii realizovanej v Bogote (Kolumbia) autori sledovali dvanásť modulových zelených striech počas troch rokov a vyhodnotili viac než dvesto zrážkových udalostí. Zistili, že priemerná retencia vody dosiahla 85 %, pričom na výsledky mala významný vplyv skladba substrátu, druh rastlín a dĺžka obdobia bez zrážok pred meraním [3]. Takéto poznatky zdôrazňujú potrebu individuálneho prístupu k návrhu striech v závislosti od miestnych podmienok. Dôležitú úlohu pri hospodárení s dažďovou vodou zohráva aj samotné zloženie vegetačnej vrstvy. Výskumy ukazujú, že dvojvrstvové substráty dokážu zadržať viac vody než jednovrstvové riešenia s jednotným

[1] Jana Grečnárová, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

materiálom. Štúdia Wang a kol., potvrdila, že takéto riešenie zvyšuje retenčnú schopnosť približne o 5 až 15 % a zároveň spomaľuje odtok. Následné experimenty ukázali, že výška substrátu a hustejší vegetačný porast zlepšujú odparovanie a prispievajú k dlhodobejšiemu zadržiavaniu vody [4].

Okrem hydrologickej funkcie je dôležité venovať pozornosť aj kvalite odtoku z vegetačných striech. Vegetácia a substrát môžu pôsobiť ako prirodzený filter, ktorý zlepšuje chemické vlastnosti vody. Niektoré materiály však môžu uvoľňovať živiny, ako dusík a fosfor, z organických látok alebo hnojív použitých pri výsadbe. Zároveň môžu uvoľňovať aj kovy, napríklad zinok, meď či olovo, z drenážnych prvkov alebo kovových častí konštrukcie [5], [6]. Tieto látky môžu krátkodobo ovplyvniť kvalitu odtoku, ich koncentrácie sa však v priebehu času spravidla stabilizujú.

Na základe doterajších poznatkov možno konštatovať, že vegetačné strechy predstavujú účinné riešenie na zníženie množstva odtekajúcej dažďovej vody a súčasne prispievajú k zmierňovaniu extrémov vodnej bilancie v urbanizovanom prostredí. Úroveň týchto účinkov je však ovplyvnená konkrétnym návrhom strechy, predovšetkým hrúbkou a typom substrátu, druhom rastlín a klimatickými podmienkami, ktoré spoločne určujú schopnosť systému vodu zadržiavať, odparovať a využívať. Tieto zistenia tvoria východisko pre výskum zameraný na hodnotenie retenčnej schopnosti experimentálnych modulov vegetačných striech v podmienkach mierneho pásma.

V tomto príspevku je hlavným cieľom analyzovať efektívnosť zloženia vegetačných striech z hľadiska zníženia odtoku zrážkovej vody. Analýza je založená na experimentálnom meraní, ktorého cieľom je preukázať i) vplyv výšky substrátu na akumulačnú schopnosť vegetačnej strechy, ii) možnosť zvýšenia retenčnej schopnosti substrátu pridaním biouhlia, iii) význam kapacity drenážno-akumulačnej vrstvy pre celkovú efektívnosť systému.

2. Materiál a metodológia

Zostavenie modulov vegetačnej strechy bolo realizované s cieľom porovnať viaceré varianty riešenia, a to z hľadiska skladby jednotlivých vrstiev aj z pohľadu výšky rastového média (strešného substrátu). Experimentálne moduly boli umiestnené na voľnej ploche v areáli STU v Bratislave, v mestskej časti Ružinov (Trnávka).

2.1 Materiál, nastavenie experimentu

Konštrukcia a parametre modulov

Na experimentálne účely bolo zrealizovaných šesť modulov z pozinkovaného plechu s pôdorysnými rozmermi 0,5 × 1,0 m a výškou 0,2 m. Na zabezpečenie sklonu odtokovej plochy (2 %) a na uľahčenie manipulácie boli moduly vybavené podpernými stojkami s výškou 0,5 m (Obrázok 1). V prednej spodnej časti modulov, v smere sklonu, boli vyhotovené trojuholníkové výrezy, ktoré slúžili na odvádzanie prebytočnej dažďovej vody z modulu. Ku konštrukcii boli pripevnené odtokové žľaby s miernym sklonom, čím sa zabezpečil plynulý odtok vody, ktorá bola zachytávaná do zbernej nádoby.

Každý modul bol zostavený ako viacvrstvový systém, ktorý zodpovedal typickej skladbe extenzívnej vegetačnej strechy. Od spodnej časti smerom nahor pozostával z drenážnej vrstvy, filtračnej textílie, rastového substrátu a vegetácie.

V rámci experimentu sa jednotlivé moduly líšili typom drenážnej vrstvy a výškou substrátu, čo umožnilo porovnať ich vplyv na retenciu dažďovej vody, vlhkostné pomery substrátu a vhodnosť vegetácie pre dané podmienky. V Tabuľke 1 sú uvedené skladby vegetačnej strechy v jednotlivých moduloch. Posledný 6 modul bol ponechaný bez vegetačných vrstiev a slúži ako kontrolná (referenčná) plocha.

Tabuľka 1: Skladba vrstiev v experimentálnych moduloch

	Modul 1	Modul 2	Modul 3	Modul 4	Modul 5	Modul 6
Sklon strechy	2%	2%	2%	2%	2%	2%
Vegetácia	sedum	sedum	sedum	sedum	sedum	kontrolný
Strešný substrát	*BTV	*BTV	*BTV	*BTV	*BTV+ 10% biouhlie	
Výška substrátu	7 cm	10 cm	14 cm	10 cm	10 cm	
Drenážna vrstva	nopová fólia (HDPE)	nopová fólia (HDPE)	nopová fólia (HDPE)	Textilná rohož	nopová fólia (HDPE)	

*BTV – Bratislavský substrát

Drenážno-akumulačná vrstva

Ako drenážna vrstva bola použitá nopová fólia z vysokohustotného polyetylénu (HDPE) s integrovanou odolnou filtračnou geotextíliou TEX, ktorá zabezpečuje jednoduchú aplikáciu materiálu. Vrstva plní funkciu akumulácie vody, pričom jej nadbytok je odvádzaný cez perforáciu v hornej časti do odkvapového žľabu. Na povrchu nopovej fólie je filtračná geotextília, na ktorú sa následne ukladá strešný substrát. V tomto experimente mali nopy výšku 20 mm a každý z nich dokáže zadržať 17,53 ml vody. Nopová fólia bola použitá v moduloch 1, 2, 3 a module 5.

V module 4 bola použitá retenčná vrstva Aquadesk, ktorá slúži ako retenčno-drenážna alternatíva k nopovej fólii. Pokladá sa priamo na separačnú geotextíliu, na ktorú sa následne ukladá substrát. Hrúbka vrstvy je 30 mm a jej maximálna vodná kapacita dosahuje 20,7 l/m². Tento materiál sa uplatňuje najmä pri strechách s nižšími statickými nárokmi, kde je potrebné znížiť zaťaženie konštrukcie. Retenčná rohož je vyrobená z recyklovaného polyesterového vlákna.

Bratislavský strešný substrát

Bratislavský strešný substrát pozostáva z rôznych častíc minerálneho a organického pôvodu, medzi ktoré patria tehlová drť, láva, kompost. Podľa údajov dodávateľa má substrát vlhkosť do 10 % hmotnosti a obsah spáliteľných látok v sušine minimálne 3 %. Obsah dusíka, fosforu a draslíka v sušine dosahuje hodnoty približne 0,07 %, 0,1 % a 0,3 %. Elektrická vodivosť nepresahuje 1,2 mS/cm a pH sa pohybuje v rozmedzí 6,5 až 8,5, čo zodpovedá mierne zásaditému prostrediu. V suchom stave má hustotu približne 0,95 t/m³ a v mokrom stave 1,39 t/m³. Vyznačuje sa vysokou schopnosťou zadržiavať vodu, čo zlepšuje podmienky pre rast rastlín a zároveň prispieva k znižovaniu odtoku zrážok z plochých aj šikmých striech [7].

Substrát sme použili v 5 moduloch. Modul 1 mal výšku substrátu 7 cm, modul 2 mal 10 cm, tretí 14 cm a štvrtý 10 cm. Do piateho modulu sme primiešali 10% biouhlia PRAuhel a zmes dosahovala výšku 10 cm (Tabuľka 1).

Biouhlie PRAuhel

Biouhlie bolo spracované procesom pyrolýzy. Počas tohto procesu dochádza k zmene štruktúry dreva v dôsledku pôsobenia vysokých teplôt. Základ biouhlia tvorí prírodný organický materiál, ako je napríklad drevo alebo slama. Podľa dokumentácie poskytnutej dodávateľom obsahuje biouhlie minimálne 35 % sušiny, pričom celkový obsah uhlíka v sušine dosahuje najmenej 45 %. Hodnota pH sa pohybuje v rozmedzí 9 až 11, čo znamená, že materiál má zásadité prostredie. Na základe predchádzajúcej laboratórnej štúdie [7], v ktorej bola hodnotená vodoodpudivosť metódou WDPT (meraná ako čas prieniku kvapky vody), bolo zistené, že biouhlie typu PRAuhel vykazuje vysokú nasiakavosť.

Pri príprave substrátu pre modul 5 sme použili 10 % podiel biouhlia PRAuhel, ktoré bolo pred aplikáciou rozdrvené na drobné častice.

Vegetácia

Na povrch substrátu bola podľa rozmerov jednotlivých modulov uložená rozchodníková rohož. Rozchodníky (*Sedum*) boli zvolené vzhľadom na ich vysokú odolnosť voči suchu, teplotným výkyvom a nízke nároky na údržbu. V moduloch 1 – 5 boli použité totožné druhy rastlín.

2.2 Zber údajov

V rámci experimentálnej zostavy sú zaznamenávané viaceré parametre súvisiace s vodnou bilanciou a klimatickými podmienkami. Zber údajov prebieha prostredníctvom preklápacieho zrážkomera v blízkosti modulov (Obrázok 1). Doplnkové údaje (vlhkosť vzduchu, teplota vzduchu a rýchlosť vetra) poskytuje meteorologická stanica katedry konštrukcií pozemných stavieb, ktorá je situovaná v areály. Pre širšie porovnanie sú využívané aj údaje SHMÚ z klimatologickej stanice 11816 Bratislava - letisko.

Na každom module bola kontinuálne monitorovaná vlhkosť substrátu a v moduloch 2 a 4 aj teplota substrátu. Vlhkosť bola meraná pomocou senzorov typu SM100 pripojených k dataloggerom, ktoré priebežne zaznamenávali namerané údaje (Obrázok 2). Senzory boli umiestnené približne v hĺbke 5 cm pod povrchom substrátu. Merania prebiehali v intervale 10 minút, čo umožnilo detailné sledovanie dynamiky zmien vlhkosti a teploty a následné vyhodnotenie termoregulačných vlastností skúmaných modulov.

Obrázok 1: Pohľad na experimentálnu zostavu modulov vegetačnej strechy

Obrázok 2: Dataloger pre meranie vlhkosti a teploty substrátu

Pre každý modul boli vypočítané denné priemery, maximá a minimá hodnôt vlhkosti a teploty substrátu. Tieto údaje boli následne porovnané s údajmi z blízkej meteorologickej stanice, čo umožnilo posúdiť vzťah medzi vonkajšími klimatickými podmienkami a správaním sa vegetačných modulov.

Po výskyte zrážok bol meraný odtok z jednotlivých modulov, kde okrem objemu odtoku sa merala aj jeho elektrická vodivosť a pH. Pričom 6 modul (kontrolný) bol ako referenčný, teda umožňuje porovnanie množstva zadržaného odtoku.

Hodnotená bola aj schopnosť jednotlivých variantov skladby vegetačnej strechy znížiť odtok zrážkovej vody a vplyv počiatočných vlhkostných podmienok na túto schopnosť.

Pre každú zrážkovú udalosť bol zaznamenaný celkový úhrn zrážok P (mm) pomocou kalibrovaného zrážkomera a celkový objem odtoku V_Rz experimentálneho modulu. Odtok bol prepočítaný na výšku vrstvy R (mm). Efektívnosť retencie bola vyjadrená ako:

$$\eta = \frac{P-R}{P} \cdot 100\% \quad (1)$$

Vplyv počiatočnej vlhkosti substrátu bol analyzovaný kategorizáciou udalostí podľa tried počiatočnej vlhkosti. Počiatočná vlhkosť substrátu a výpar neboli zahrnuté do výpočtu retencie jednotlivých skladieb strechy.

3. Výsledky experimentu a diskusia

Analyzované výsledky boli za obdobie od 24. júla do 24. septembra 2025, teda dva mesiace meraní. Išlo o letné obdobie, kde bol výskyt ako obdobia sucha, tak a aj daždivých dní s vyšším denným úhrnom. Teploty vzduchu sa pohybovali v rozsahu 10 – 35 C°. Vlhkosť vzduchu bola nižšia, avšak typická pre toto ročné obdobie. V Tabuľke 2 uvedené základné meteorologické údaje pre experimentálnu plochu.

Tabuľka 2: Priemerné merané charakteristík počas hodnoteného obdobia (zdroj: SHMÚ)

Obdobie	Teplota vzduchu (C°)	Vlhkosť vzduchu (%)	Úhrn zrážok (mm)
Júl (24.7. – 31.7.)	21,4	6,8	30,8 (max. denný 21,2)
August (1.8. – 31.8.)	21,1	6,1	62 (max. denný 29,8)
September (1.9. – 23.9.)	17,4	7,3	41,4 (max. denný 16,8)

Zrážkový režim

Zrážkový režim bol priebežne monitorovaný pomocou zrážkomera umiestneného pri experimentálnej zostave. Počas sledovaného obdobia bolo zaznamenaných celkovo 18 zrážkových dní, v rámci ktorých bola najdlhšia zrážková epizóda dňa 26. júla, kedy pršalo približne 13 hodín s celkovým úhrnom 21,2 mm zrážok.

V mesiaci august bolo zaznamenaných 9 zrážkových dní a 22 dní bez zrážok. Celkový mesačný úhrn dosiahol 62 mm, pričom maximálna zrážková udalosť sa vyskytla 21. augusta 2025 s úhrnom 29,8 mm. Intenzita zrážky počas daždivých hodín dosiahla hodnotu 4,97 mm/h, pričom doba zrážkovej epizódy trvala približne 6 hodín.

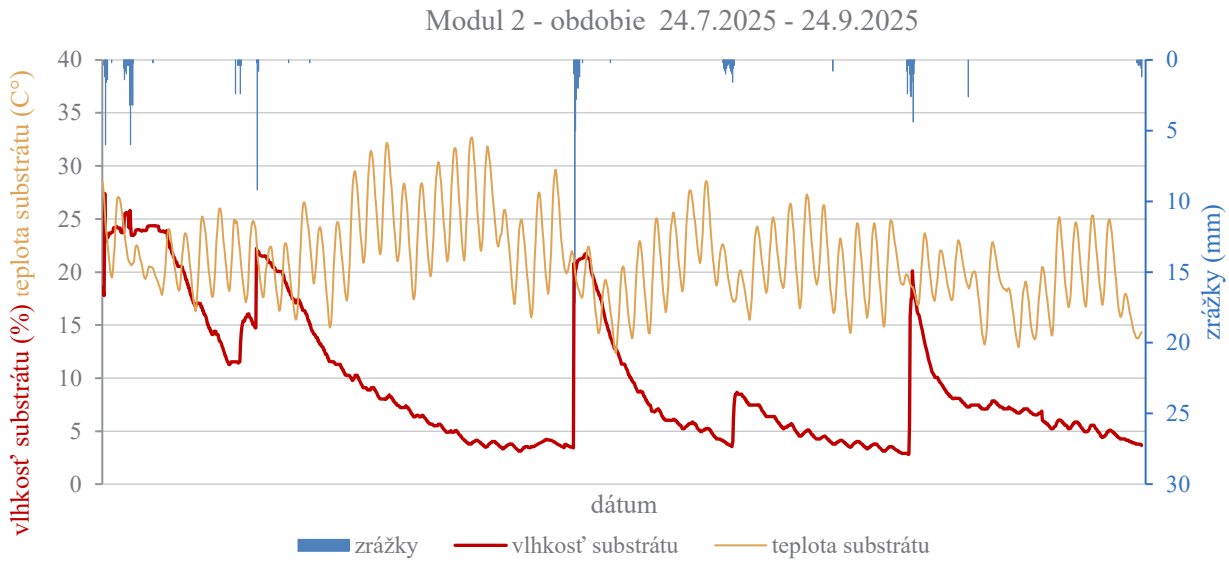
V mesiaci september bolo zaznamenaných 7 zrážkových dní a 23 dní bez zrážok. Celkový mesačný úhrn dosiahol 41,40 mm. Maximálna zrážková udalosť bola zaznamenaná 10. septembra 2025 s úhrnom 16,80 mm. Intenzita zrážky dosiahla hodnotu 1,60 mm/h a trvanie zrážky bolo približne 10 hodín.

Sledované obdobie sa vyznačovalo nerovnomerným rozdelením zrážok, ktoré tvorilo niekoľko krátkodobých, no intenzívnych epizód striedaných s dlhšími obdobiami sucha. Takýto priebeh poskytol vhodné podmienky na sledovanie retenčnej schopnosti experimentálnych modulov vegetačných striech. Na Obrázku 3 je uvedená ukážka priebehu záznamu vlhkosti, teploty substrátu a zrážok za sledované obdobie.

Zaznamenaný objem odtoku

Po každej zrážkovej udalosti bol zaznamenaný objem vody akumulovaný v zberných nádobách a to pomocou odmerného valca. V sledovanom období bolo celkovo identifikovaných 11 zrážkových

epizód, ktoré sa vyhodnocovali. V Tabuľke 3 je prehľad zrážkových epizód aj s hodnotami kumulatívneho odtoku z jednotlivých modulov vegetačnej strechy.

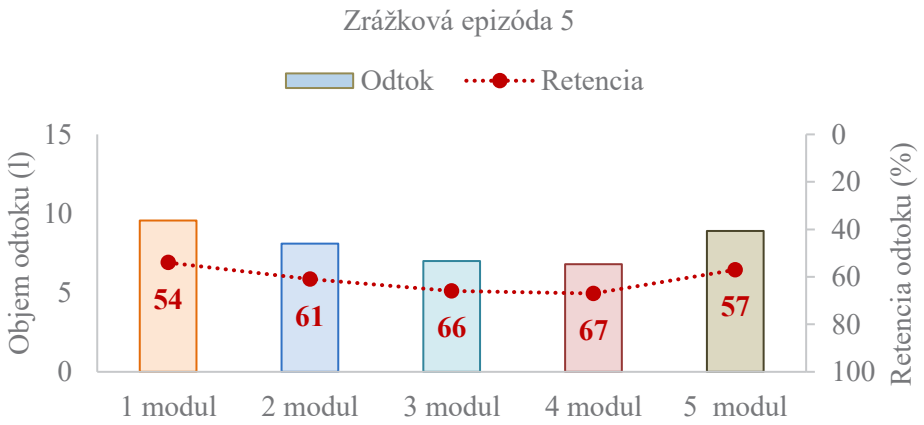


Obrázok 3: Priebeh záznamu vlhkostí, teplôt substrátu a zrážok za obdobie 24.07.2025- 24.09.2025

Tabuľka 3: Prehľad zrážkových epizód za obdobie 24.07.2025 - 24.09.2025

Počet epizód	Dátum	Úhrn zrážok (mm)	Objem odtoku (l)				
			Modul 1	Modul 2	Modul 3	Modul 4	Modul 5
1	24-07-25	9,20	x	x	x	9,24	8,05
	25-07-25	2,2					
	26-07-25	21,2					
	27-07-25	0,2					
2	01-08-25	6,2	2,159	2,508	1,645	1,524	2,41
	02-08-25	11					
3	04-08-25	0,2	0	0	0	0	0
4	06-08-25	0,2	0	0	0	0	0
5	21-08-25	29,8	9,56	8,1	6,8	6,8	8,9
	22-08-25	4					
6	23-08-25	0,2	0	0	0	0	0
7	30-08-25	4,6	0,228	0,29	0,23	0,23	0,26
	31-08-25	5,8					
8	06-09-25	0,8	0,03	0,02	0,005	0,005	0,01
9	10-09-25	16,80	1,425	1,04	0,6	0,6	1,565
	11-09-25	1,2					
10	14-09-25	2,6	0,08	0,09	0,068	0,068	0,065
11	24-09-25	3,4	0,48	0,51	0,355	0,355	0,49

V uvedených dňoch bol úhrn zrážok 33,8 mm, čo bol najvyšší úhrn v sledovanom období. Pri interpretácii treba vziať do úvahy aj poveternostné podmienky a počiatočnú vlhkosť substrátu. V tomto prípade boli ideálne podmienky, čo sa týka vlhkosti substrátu, pred zrážkami bol suchý (hodnoty v moduloch obj. vlhkosť do 5%) (Obrázok 5).

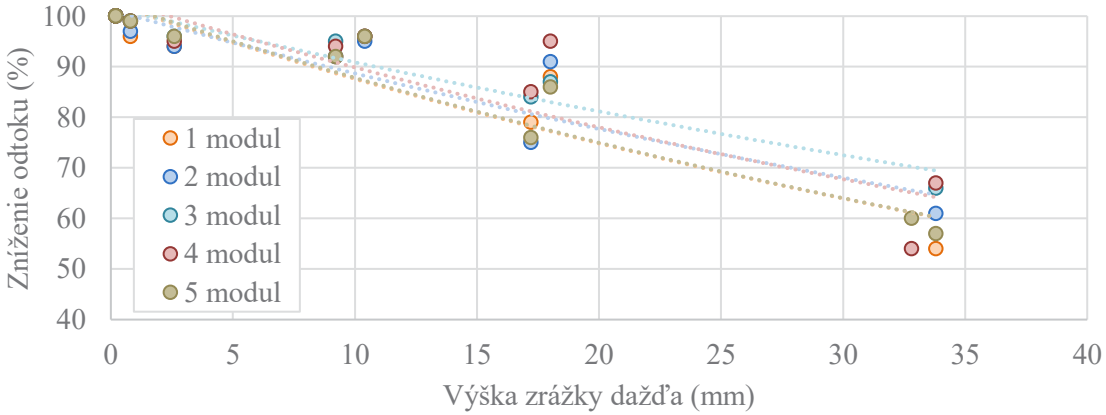


Obrázok 4: Zrážková udalosť 5 – objem odtoku z jednotlivých modulov a ich retencia

Retencia odtoku vzhľadom na modul 6 (kontrolný) bola v rozsahu 54 až 67%, čo je najnižšia hodnota v sledovanom období. Pri menších úhrnoch zrážok (do 1 mm) sa odtok väčšinou ani nevytvoril. Pri dažďoch s úhrnom do 10 mm predstavoval retenčný potenciál 90 a viac percent.

Aj napriek pomerne malému počtu zrážkových epizód sa potvrdilo, že výška substrátu má významný vplyv na retenčný potenciál. Výsledky ukazujú, že taktiež počiatočná vlhkosť substrátu môže výrazne ovplyvniť vznik odtoku.

Na Obrázku 5 je uvedený vzťah medzi výškou úhrnu dažďa a retenciou odtoku, kde je vidieť ako pri vyššej počiatočnej vlhkosti (napr. po predchádzajúcich dažďoch) bola schopnosť substrátu prijať ďalšiu vodu obmedzená a odtok bol vyšší pri podobnej zrážke.



Obrázok 5: Vzťah medzi úhrnom zrážok a retenčným potenciálom jednotlivých skladieb vegetačnej strechy

Z doterajších výsledkov sa neprejavil vplyv biouhlie a typ drenážnej vrstvy. Čo však možno konštatovať je zmena kvality odtoku po vizuálnej stránke, ako aj hodnôt elektrickej vodivosti. Hodnoty pH odtoku boli pomerne vyrovnané vo všetkých moduloch.

Teplota substrátu sa pohybovala medzi 19 a 25 °C, a bola v korelácii s teplotou vzduchu. Vyššia teplota prispievala vyparovaniu, teda k rýchlejšiemu vysychaniu substrátu medzi jednotlivými zrážkami, čo sa prejavilo nižšou počiatočnou vlhkosťou a menším odtokom. Pri vyššom počte zrážkových epizód bude možné lepšie hodnotiť výsledky podľa tried počiatočnej vlhkosti, resp. v sezónach.

Porovnaním jednotlivých modulov sa preukázali rozdiely v retenčnej schopnosti v závislosti od výšky substrátu a zloženia jednotlivých vrstiev. Zhrnutie výsledkov je možné vidieť v Tabuľke 6.

Tabuľka 6: Zhrnutie výsledkov jednotlivých modulov

Modul	Skladba vrstiev modulov	Zhrnutie
1	Nopová folia + 7 cm *BTV substrát + vegetácia	Nižšia retenčná schopnosť
2	Nopová folia + 10 cm *BTV substrát + vegetácia	Vyššia retenčná schopnosť
3	Nopová folia + 14 cm *BTV substrát + vegetácia	Vyššia retenčná schopnosť
4	Textilna rohož + 10 cm *BTV substrát + vegetácia	Pri vysokých teplotách suchá rohož zadržiavala viac vody, no po jej nasiaknutí sa schopnosť zadržiavania znižovala.
5	Nopová folia + 10 cm *BTV substrát + 10% biouhlie vegetácia	Nižšia retenčná schopnosť

*BTV – Bratislavský substrát

4. Záver

Získané výsledky predstavujú úvodné merania, ktoré poskytujú základný prehľad o správaní jednotlivých skladieb vegetačných striech. Napriek krátkemu sledovanému obdobiu možno konštatovať, že stanovené ciele príspevku boli naplnené. Vplyv výšky substrátu na akumulačnú schopnosť bol jednoznačne preukázaný, pričom väčšie výšky substrátovej vrstvy zadržiavali väčšie množstvo vody. Prídavok 10 % biouhlu do substrátu zatiaľ nepreukázal zvýšenie retenčných vlastností substrátu. Potvrdil sa význam kapacity drenážno-akumulačnej vrstvy, ktorá zohrávala dôležitú úlohu najmä pri zmenách vlhkosti po suchých a daždivých obdobiach.

Pre presnejšie zhodnotenie retenčného potenciálu, dlhodobej stability a sezónnych rozdielov bude potrebné pokračovať v meraniach počas dlhšieho časového obdobia. Takéto rozšírené pozorovanie umožní lepšie porovnať vývoj vlhkosti, odtoku a celkové správanie sa jednotlivých vrstiev a modulov.

Poďakovanie

Spracovanie štúdie bolo podporené prostredníctvom finančnej podpory grantovým projektom VEGA č. 2/0115/25 a Programu na motiváciu a podporu zvyšovania kvality a efektívnosti vedeckovýskumnej činnosti mladých vedecko-výskumných pracovníkov (názov projektu: HYDROVEGE)

Literatúra

[1] ZHENG, X. – ZOU, Y. – LOUNSBURY, A. W. – WANG, C. – WANG, R. Green roofs for stormwater runoff retention: A global quantitative synthesis of the performance, Resources, Conservation and Recycling. *Resources, Conservation and Recycling 2021*, Volume 170 [cit. 07.10.2025]. ISSN 0921-3449. Dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105577.

[2] SIMS, A.W. – ROBINSON, E. C. – SMART, CH. C. – VOOGT, J. A. – HAY, G. J.- LUNDHOLM, J. T. – POWERS, B. – O´CARROLL, D. Retention performance of green roofs in three different climate regions. *Journal of Hydrology 2016, Volume 542, pp. 115-124.* ISSN 0022-1694 [cit. 07.10.2025]. Dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.055.

[3] FERRANS, P. – REY, C.V. – PÉREZ, G. – RODRIGUEZ J. P. – DIAZ-GRANADOS, M. Effect of Green Roof Configuration and Hydrological Variables on Runoff Water Quantity and Quality. *Water 2018, 10 (7)* [cit. 07.10.2025]. Dostupné na: https://doi.org/10.3390/w10070960.

[4] WANG, J. – GARG, A. – HUANG, S. – MEI, G. – LIU, J. – ZHANG, K. – GAN, L. The rainwater retention mechanisms in extensive green roofs with ten different structural configurations. *Water Science & Technology 2021, 84 (7)* [cit. 07.10.2025]. Dostupné na: https://doi.org/10.2166/wst.2021.413

[5] JATI, A.C. – LUTHFI, A. – MAHENDRA, I.I.B. – PUWANTO, Y.A. – KURNIAWAN, A. – CHADIRIN, Y. Analysis of Rainwater and Runoff Water Quality on Vegetated and Unvegetated Green Roof. *BIO Web of Conferences 2024, Volume 123* [cit. 07.10.2025]. Dostupné na: https://doi.org/10.1051/bioconf/202412304004

[6] VIJAYARAGHAVAN, K. – JOSHI, U.M. – BALASUBRAMANIAN, R. A field study to evaluate runoff quality from green roofs. *Water Research 2012, Volume 46, Issue 4, pp. 1337-1345.* [cit. 07.10.2025] *ISSN 0043-1354.* Dostupné na: https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.050

[7] GREČNÁROVÁ, J. Experimentálne meranie retenčnej schopnosti strešného substrátu. *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering (AACEE 2023),* Volume 33, pp. 470-478. [cit. 16.10.2025] ISBN 978-80-227-5378-4. Dostupné na: https://www.svf.stuba.sk/buxus/docs/aacee/Zbornik_AACEE_2023.pdf

Lili Megyer-Muraközy
Study program: Landscaping, 2nd year

DATA PROCESSING AND PRELIMINARY REGIME-CHANGE ANALYSIS AT THE HERMES FOREST METEOROLOGICAL STATION (1985–2024)

Abstract:
Local hydrometeorological measurements are important for providing accurate region-specific data that reflect unique climatic and geographic conditions. They can reveal microclimatic trends often overlooked in global datasets and serve as a valuable reference for validating model- or satellite-based observations, thereby enhancing the overall reliability of climate data. In this study, I digitized and conducted quality control (with missing data detection, error correction, comparison with verified station data) on unprocessed meteorological data from the Hermes station, located in a hilly, forested region near Sopron, Hungary. The data was processed from 1985 to 2024, with a focus on two 10-year periods (1986–1995 and 2014–2023). These periods were compared to official data from the Sopron station using basic statistical methods, including time series analysis and precipitation frequency evaluation.

Keywords: hydrometeorology; data processing; quality control; regime change; precipitation frequency

1. Introduction

Analysis of long hydrometeorological records has been recognized as essential for understanding climate variability and change, improving water-resources management, and interpreting extremes in a nonstationary context. The maintenance, data storage, and processing of local meteorological stations are essential for a more comprehensive understanding of regions with diverse characteristics. These meteorological stations can provide information on the characteristics of a given area, validate the results of model and grid observations, and increase the reliability of climate data. The dense network of weather stations can capture the differences between the microclimatic differences (in our case between city and forest) [1] It is very important that to have good quality and long-term meteorological data series, to properly assess climate change and its impact on forests and city. [2]

The aim of the study was to process and analyze forest meteorological data from a hilly area that had not yet been digitized, using simple statistical methods, focusing on two periods and climatic differences from the city.

2. Data and Study area

The Hermes station is situated in a forested, hilly area near Sopron, Hungary (47°39′14.0″N, 16°28′17.9″E, 504 m above sea level). The site is non-standard relative to WMO exposure due to partial shading by trees and surrounding structures; however, it is representative of local forest microclimate. (Figure 1) The Kuruc Hill station, located within Sopron, is operated as the official urban reference. The

Lili Megyer-Muraközy, Department of Land and Water Resources Management, Radlinského 11, Block C, 12th floor, 810 05 Bratislava, Slovak Republic

inter-station distance is approximately 10.2 km. Daily minimum, maximum, and mean air temperature and daily precipitation sums were available from 1985-05-01 to 2024-12-31 for Hermes, and a validated reference series was available for Kuruc Hill for comparative analysis. [3]

Figure 1: Hermes station and its environment (Google maps)

3. Methods

3.1. Data digitization and reconstruction

Climate records were digitized and unified into a single database. Screening included constant-value filtering, outlier detection, and gap identification. [4] There were two types of errors: random errors (unpredictable fluctuations from human mistakes and instrument limitations) and systematic errors (consistent biases that may be constant, stepwise or trend-wise). The Hermes station was compared with the Kuruc Hill data for data validation (to flag and, where justified, to gap out implausible entries). Reconstruction was limited to conservative steps at this stage (e.g., removal of obvious decimal misplacements) and no full statistical homogenization was applied to Hermes in this preliminary phase.

3.2. Statistical analysis

Two decade-long windows were analysed (1986-1995 and 2014-2023) with an intentional gap that allows changes to develop. Between the two stations due to their location, the effect of landuse change and urbanization effects can be examined [5]. Double-mass analysis verified data integrity, standard statistical testing to compare means and distributions and moving averages to visualize trends [6]. Correlation analysis, distribution analysis was performed, methods designed to identify trends, ensure data homogeneity, and quantify comparative differences [7].

Daily data were aggregated to monthly and annual summaries where needed. Distributional properties of temperature were evaluated using box-plot summaries and by visual inspection of empirical quantiles. Precipitation characteristics were summarized by frequency and cumulative contribution within fixed daily-sum categories (0–2, 2–5, 5–10, 10–20, 20–50, and >50 mm). The change was investigated using simple linear fits for visualization, cumulative cross-station comparisons for consistency, and autocorrelation methods were applied to the annual series to identify any patterns of persistence.

4. Results and Discussion

Figure 2 shows the entire raw air temperature time series, with the missing data (Figure 2) Daily means air temperatures and precipitation sums from 1986 to 1995 and from 2014 to 2023 at Hermes exhibited a strong relationship for both periods with Kuruc Hill, with a coefficient of determination in temperature approximately 0.98 for the past and 0.97 for the present. For the precipitation it's 0.84 and 0.78, which is weaker than the temperature, but it still can count as strong correlation. We can see that the relationship for the present period has loosened, it can be caused by the growth of the trees around the Hermes station. But the relationship is still strong enough to use Kuruc Hill as a reference for first-pass screening and confirms that Hermes temperature dynamics are physically coherent despite its non-standard exposure and it shows that Hermes is the one with the lower temperature. (Figure 3 and 4)

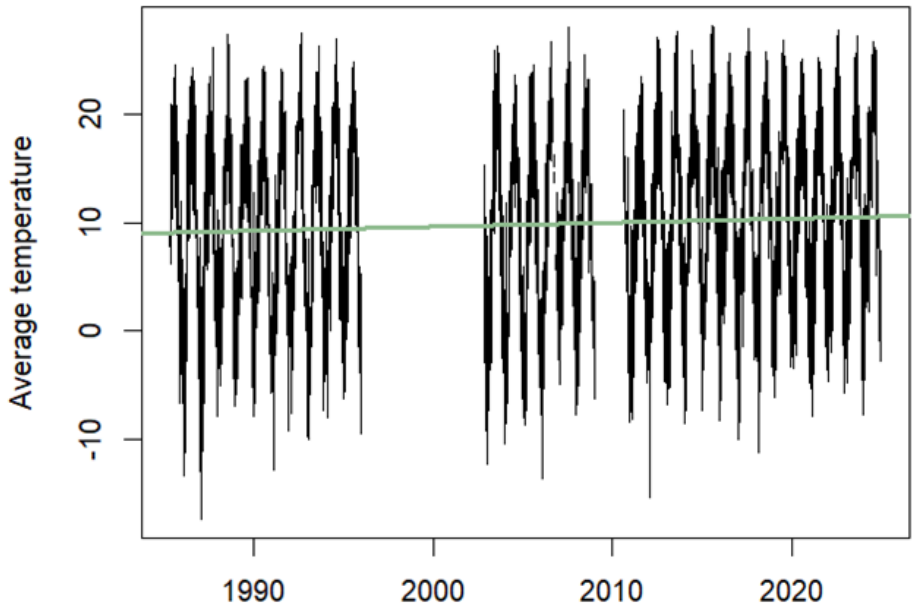


Figure 2: Daily air temperature of Hermes from 1985 to 2024

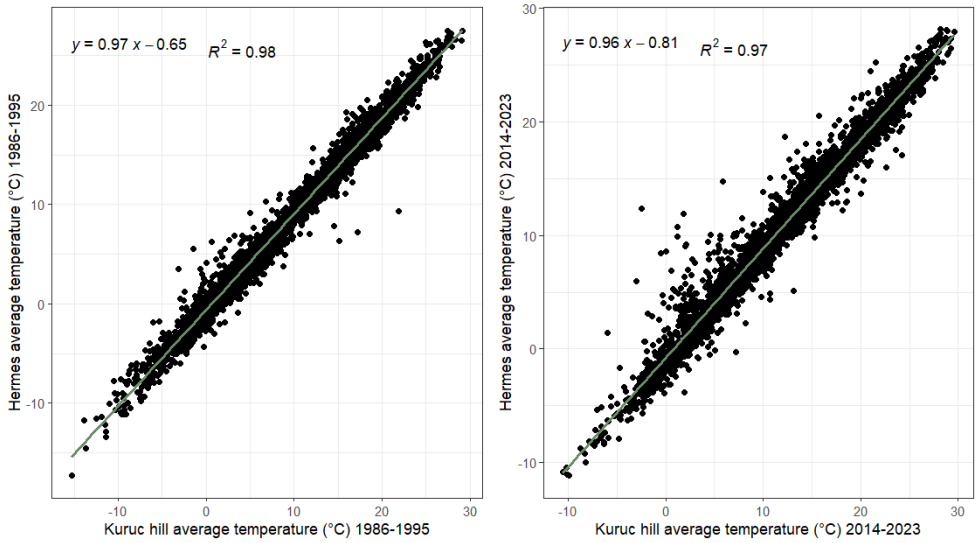


Figure 3: Comparison of Kuruc hill and Hermes daily air temperature data

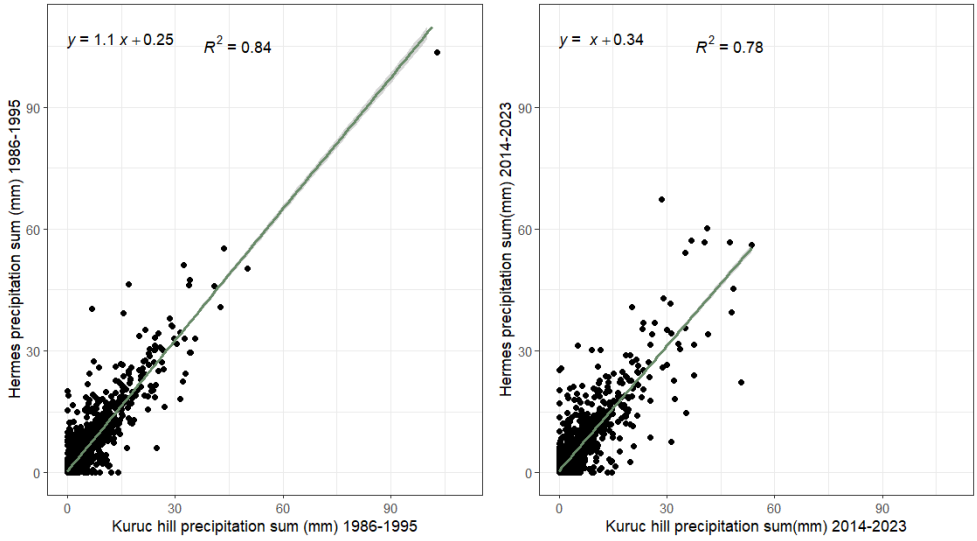


Figure 4: Comparison of Kuruc hill and Hermes daily precipitation sum data

Double mass curve analysis conducted for both quantities for the whole period (without the years with missing data) reveals strong correlations between the datasets. (Figure 5)

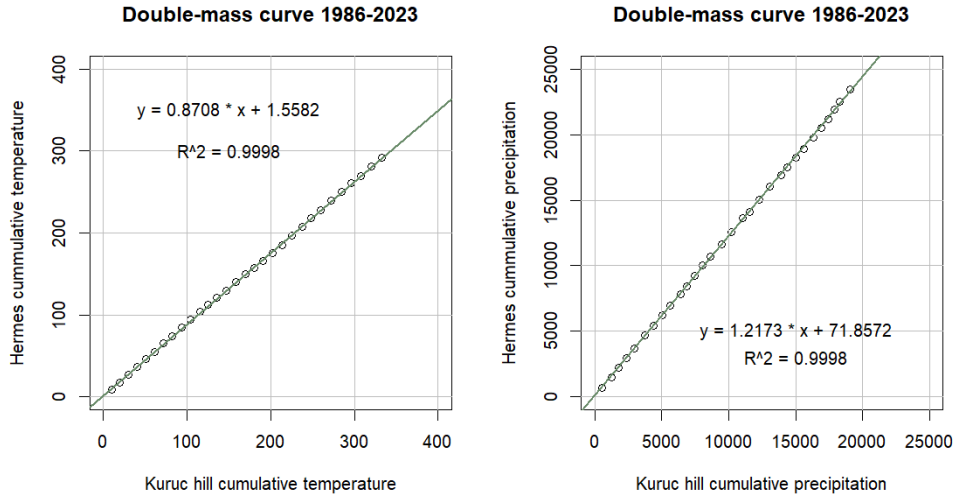


Figure 5: Double mass curve between Kuruc hill and Hermes for cumulative temperature and precipitation from 1986 to 2023

The temporal and spatial changes were investigated with different kinds of techniques. Box-plot summaries indicated upward shifts in median temperatures at both stations between the two decades. A larger rise in lower-tail (minimum) temperatures at the urban site was noted, consistent with an enhanced nocturnal warming signal typically reported in urban heat-island contexts. Variance narrowing was observed for both locations, suggesting a reduced spread in daily mean temperatures in the recent decade. (Figure 6)

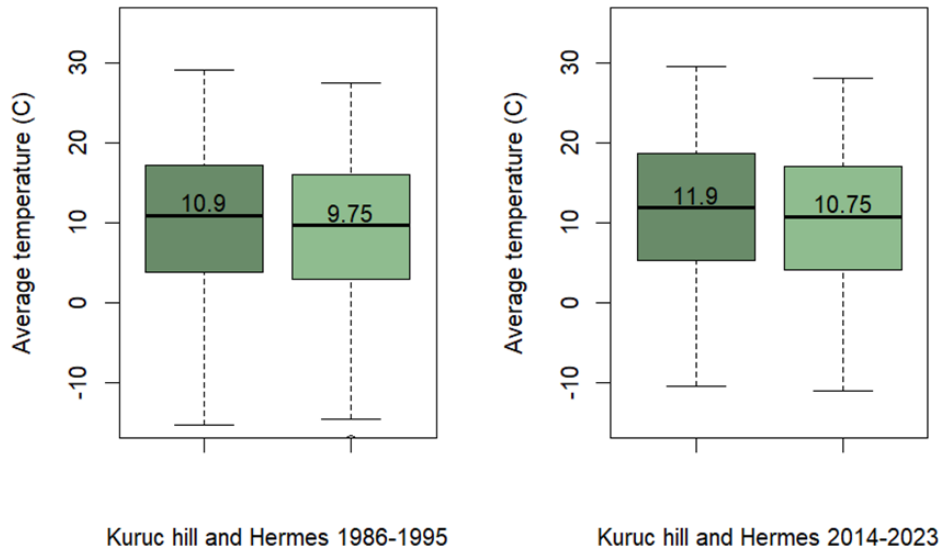


Figure 6: Average temperature boxplots of Kuruc hill and Hermes between 1986 and 1995 (left) and between 2014 and 2023 (right)

The annual mean temperatures show that Hermes series was consistently cooler than the urban reference in both decades, as expected from canopy shading and reduced urban heat inputs. (Figure 7)

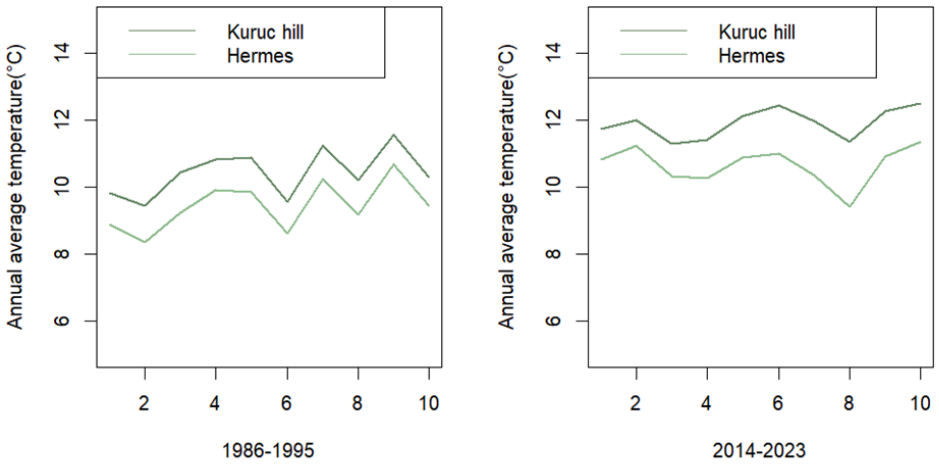


Figure 7: Annual mean temperature of Kuruc hill and Hermes between 1986 and 1995 (left) and between 2014 and 2023 (right)

The annual precipitation sums also changed characteristics, for the present period, the precipitation sums are not that parallel between the two stations as they were before. It can be caused by the tree growth around Hermes station, which can cause wind protection (it means more precipitation in the rain gauge. (Figure 8)

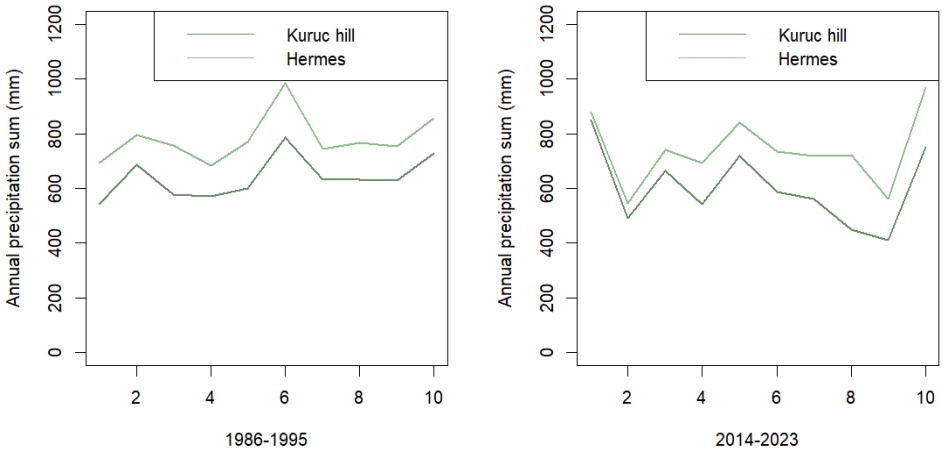


Figure 8: Annual precipitation sums of Kuruc hill and Hermes between 1986 and 1995 (left) and between 2014 and 2023 (right)

Frequency analysis by fixed daily-sum classes suggested a higher occurrence and increased contribution of larger events in the forested Hermes setting in the present decade. While this may reflect genuine mesoscale processes and orographic-canopy interactions, it may also be partially influenced by sitting-related exposure effects on catch efficiency (Figure 9, 10, 11 and 12).

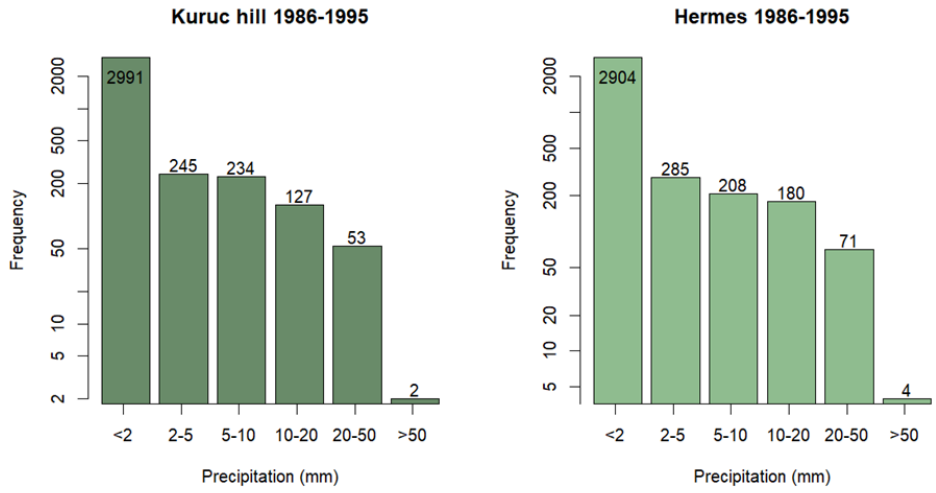


Figure 9: Frequency of precipitation events by categories at Kuruc hill (left) and Hermes (right) between 1986 and 1995

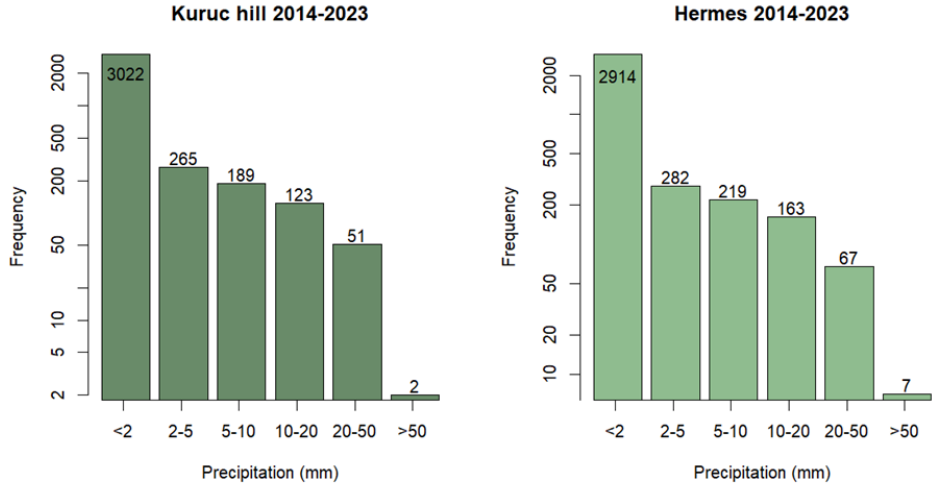


Figure 10: Frequency of precipitation events by categories at Kuruc hill (left) and Hermes (right) between 2014 and 2023

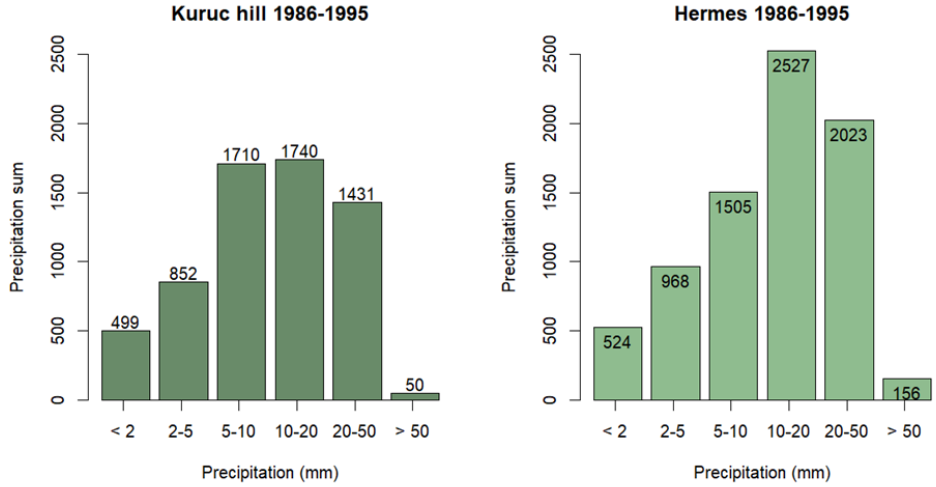


Figure 11: *Precipitation sums by categories at Kuruc hill (left) and Hermes (right) between 1986 and 1995*

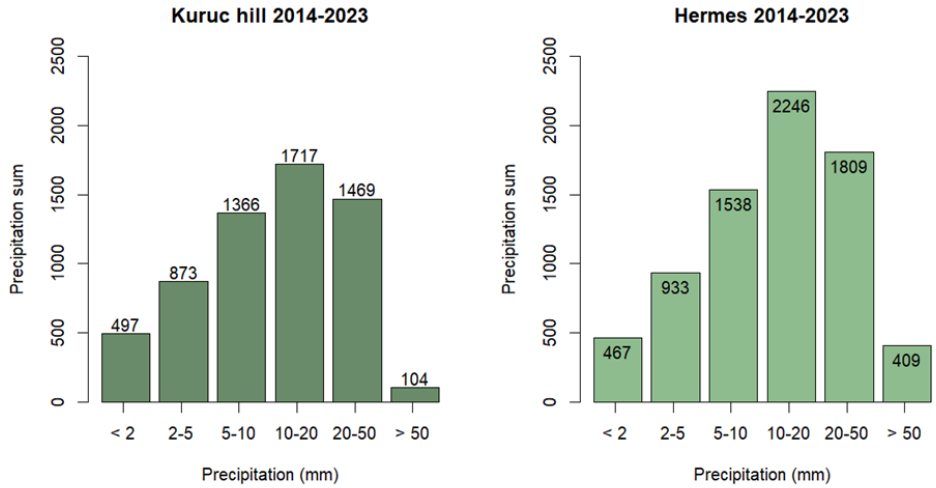


Figure 12*: Precipitation sums by categories at Kuruc hill (left) and Hermes (right) between 2014 and 2023*

5. Additional analyses feasible with the current dataset

With this digitized daily record, the following analyses can be made in the future:
Formal homogeneity testing at Hermes, quantile-based change assessment for temperature (non-crossing quantile regression).
Precipitation (peaks-over-threshold for fixed return-period levels) can be made.
Analysis for wet-day frequency and transition probabilities to characterize persistence of precipitation.
Drought indices (SPI/SPEI) can be used at multiple accumulation windows to triangulate with precipitation redistribution and temperature-driven demand.

Simple monthly water-balance modelling (e.g. Thornthwaite-type) for Hermes and Kuruc Hill using climatic monthly means derived from the daily data; comparisons of annual ET, soil-moisture drawdown timing, and availability for recharge/runoff can then be made.
Cross-station attribution with a wider neighbour set may be done (e.g. additional Hungarian and Austrian stations) to separate regional forcing from site effects.

6. Conclusion

Hermes air temperatures were consistently lower than those at Kuruc Hill, and daily means covaried closely ($R^2 \approx 0.98$ for past and $R^2 \approx 0.97$ for present period), supporting cross-use for screening. Median temperatures increased at both stations between 1986–1995 and 2014–2023, with a comparatively stronger rise in lower-tail temperatures at the urban site. Annual precipitation coherence weakened in the recent decade, and a higher frequency and contribution of larger daily precipitation events was indicated at Hermes. The results support redistribution-centered change rather than a uniform change in totals, formal homogenization and neighbour controls are required before final attribution.

The correlation between the two stations has been loosened for the present period, which can be caused by environmental changes (tree growth) around Hermes station. It is important to note this kind of change in the station locations, especially if we want to use the data for modelling.

After homogenization, monthly water balance comparisons can be performed from this new database, allowing new Hermes-based conclusions to be consistently integrated into previous Sopron frameworks and supporting site-specific management conclusions for forests and urban water systems.

7. Literature

[1] EINGRÜBER, N., KORRES, W., SCHNEIDER, K.: Microclimatic field measurements to support microclimatological modelling with ENVI-met for an urban study area in Cologne, 2022, Adv. Sci. Res., 19, 81–90, https://doi.org/10.5194/asr-19-81-2022.

[2] DINGMAN, S. L.: Physical Hydrology. Third edition, University of New Hampshire, Waveland Press, Inc., 2015, 657 p

[3] https://odp.met.hu 2025.10.01.

[4] MÉSZÁROS R.: Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek. (Meteorological instruments and measuring systems) Eötvös Loránd Tudományegyetem. 2013, 210 p.

[5] NAGHETTINI, M.: Fundamentals of statistical hydrology: Cham, Springer, 2017, 660 p.

[6] ŞEN, Z.: Moving Trend Analysis Methodology for Hydro-meteorology Time Series Dynamic Assessment. *Water Resour Manage* 38, 4415–4429, 2024. https://doi.org/10.1007/s11269-024-03872-2

[7] BANDA, V. D., DZWAIRO, R. B., SINGH, S. K., AND KANYERERE, T.: Trend analysis of selected hydro-meteorological variables for the Rietspruit sub-basin, South Africa: *Journal of Water and Climate Change*, v. 12, 2021. 3099–3123 p. https://doi.org/10.2166/wcc.2021.260

Acknowledgement:
This study was financially supported by the Slovak Research and Development Agency under Contract No. APVV 23-0332. This study was financially supported by The Programme for Motivation

and Support for Increasing the Quality and Efficiency of Scientific Research Activities of Young Researchers, Contract No. 1636.The research was supported by the OTKA grant 143972SNN, the Slovenian Research and Innovation Agency grant N2-0313 and the associated project TKP2021-NKTA-43. The project TKP2021-NKTA-43 was implemented with the support of the Ministry of Innovation and Technology through the National Fund for Research Development and Innovation, funded by the TKP2021-NKTA call for proposals.

Lynda Paulíková
Študijný program: Vodohospodárske inžinierstvo, 4. ročník

SÚČINITEĽ ODTOKU: SEZÓNNOSŤ A JEJ VPLYV NA VÝSLEDNÚ VÝŠKU ODHADU

RUNOFF COEFFICIENT: SEASONALITY AND ITS IMPACT ON THE FINAL ESTIMATION

Abstract

The presented study aims to analyse peak runoff coefficients (φ_N) in two small catchments in Slovakia using the indirect and direct method. In the indirect method we used the time of concentration estimated with Kirpich formula and rainfall intensitie derived from Digital atlas of rainfall intensity and IDF curves. For the direct method we used rainfall-runoff data series (measured in daily step), from which we obtained flood wave parameters. The data were then statistically analysed using Johnsons propability distribution. For both catchments, the peak runoff coefficient corresponding to a 100-year return period was estimated separately for summer and winter seasons The estimated peak runoff coefficients are compare with findings from previous studies to compare the two methods and their application in practice.

Kľúčové slová / Key Words
Vrcholový súčiniteľ odtoku; časové rady údajov, racionálny vzorec, malé povodia

1. Úvod

Otázka tvorby odtoku v krajine predstavuje predmet záujmu mnohých vedcov už od antiky [1, 2] a aj v súčasnosti zostáva jedným z kľúčových konceptov s ktorým sa hydrológovia a inžinieri často potýkajú [3, 4]. Je to z dôvodu, že napriek tomu, že koncept tvorby odtoku prešiel v priebehu času rôznymi interpretáciami [1, 5, 6] stále nemáme úplne objasnené všetky súvislosti spojené s procesmi generovania odtoku v krajine [3, 4]. V súčasnosti najrozšírenejšou metódou pre odhad veľkosti odtoku na povodí je tzv. racionálna metóda, ktorá vychádza zo základných charakteristík povodia [7 - 9]. Hoci pôvod tejto rovnice siaha do 19. storočia [5, 7, 8] jej interpretácia sa v čase zmenila len minimálne, pričom nie vždy je dostatočne prispôsobená špecifikám rôznych hydrologických podmienok. Atraktívnosť tejto rovnice spočíva najmä v jej jednoduchej aplikácii, čo je významné najmä na povodiach bez zrážkovo-odtokových meraní [10, 11]. Najväčšou neistotou v racionálnej rovnici je súčiniteľ odtoku (φ_N) – bezrozmerné číslo vyjadrujúce množstvo zrážok, ktoré sa podieľajú na priamom odtoku [9, 12]. V súčasnosti neexistuje univerzálna metóda na jeho stanovenie, a jeho výber často závisí od subjektívneho posúdenia inžiniera podľa rôznych existujúcich tabuliek a metód [13 - 21] na jeho odhad. Základný princíp racionálnej rovnice predpokladá, že vrcholový odtok na povodí nastane v momente, keď sa do odtoku zapojí celé povodie [7 - 9]. Tento predpoklad však nie je zárukou, že vrcholový odtok skutočne nastane aj keď sú splnené podmienky pre jeho vznik [22]. Navyše sa často predpokladá, že fyzikálne vlastnosti povodia majú len obmedzený vplyv na výšku odtoku [23], čo môže viesť k zjednodušeniam.

Zaujímavé je, že už v starších štúdiách sa objavili prípady, keď pri spätnom výpočte vyšiel súčiniteľ odtoku väčší ako 1 [24 - 26]. To otvára otázku, či je naše súčasné chápanie procesov odtoku na povodí dostatočné a správne.

Na túto otázku by mohli odpovedať nové metódy, ktoré využívajú pre odhad súčiniteľa odtoku časové rady zrážkovo-odtokových údajov na povodí [27 - 31]. Tieto metódy pri spracovaní údajov využívajú rôzne štatistické analýzy na určenie základného odtoku a základných parametrov povodňových vĺn na základe ktorého sa odhadne súčiniteľ odtoku. Výhodou týchto metód je ich jednoduchá aplikácia a časová nenáročnosť. Stále však existuje mnoho povodí, ktoré nedisponujú sériovými údajmi o odtoku a zrážkach. Preto je cieľom predloženej štúdie zamerať sa na odhad súčiniteľa odtoku nielen nepriamou metódou (t.j. racionálny vzorec), ale aj priamou metódou (štatistické spracovanie časových radov údajov) a porovnať výsledné odhady. Výsledky majú pomôcť pochopiť aplikáciu súčiniteľa odtoku v praxi.

2. Vstupné údaje

Predmetom štúdie je malé povodie Jaloveckého potoka – profil stanice Liptovský Mikuláš (v texte označovaný skrátene LM-JP) a povodie toku Parná – profil stanice Horné Orešany (v texte označovaný skrátene HO-P).

Povodie LM-JP má plochu 22,2 km^2 a je lokalizované severovýchodnej časti Slovenska pod pohorím Vysoké Tatry v blízkosti vodnej priehrady Liptovská Mara. Povodie môžeme charakterizovať ako horské s priemernou nadmorskou výškou 1502 m n. m. a s priemerným sklonom povodia 30°. Povodie je prevažne lesnaté vykazujúce v zimných mesiacoch dlhodobejšiu snehovú pokrývku.

Obrázok 1: Lokalizácia povodia HO-P (na mape A) a povodia LM-JP (na mape B)

Povodie HO-P meria 31,9 km^2 a je lokalizované v západne časti Slovenska. Povodie má nížinný charakter (332 m n. m.) s priemerným sklonom 12°. Prevažnú časť povodia tvoria listnaté lesy.

Dôvodom spracovania analýz pre zvolené povodia je dostupnosť zrážkovo-odtokových údajov. Povodie LM-JP a HO-P disponujú údajmi o zrážkových úhrnoch meraných v dennom kroku a údajmi o prietoku merané v hodinovom kroku od roku 1989 do 2021. Tieto údaje je možné rozdeliť na zimné a letné mesiace pre porovnanie vplyvu topenia snehu a iných faktorov na výsledný odtok.

3. Metodika

Predložená štúdia je rozdelená na dve časti. Prvá časť štúdie sa venuje odhadu súčiniteľa odtoku pre dobu opakovania N = 100 rokov za použitia nepriamej metódy. Nepriama metóda vychádza zo základnej koncepcie tvorby odtoku na povodí, kde vrcholový odtok na povodí sa tvorí v momente, keď je do odtoku zapojené celé povodie. Ako vstupné údaje sa použije plocha povodia (F) a intenzita návrhového dažďa ($i_{t,N}$) odvodená z času koncentrácie (t_c), ktoré sa následne dosadia do racionálnej rovnice. V predloženej štúdie sme využili racionálnu rovnicu, kde [7, 8, 9]:

$$Q_N = F * i_{D,N} * \varphi_{V,N} \quad (1)$$

Kde:
Q_N – kulminačný prietok pre N ročnú dobu opakovania [m^{3}s^{-1}],
F – plocha povodia [km^2],
$i_{D,N}$ – intenzita návrhového dažďa pre periodicitu P = 0,01 [mm min^{-1}],
$\varphi_{V,N}$ – vrcholový súčiniteľ odtoku [–].

Pri určovaní intenzity návrhového dažďa sme vychádzali z doby koncentrácie (t_c) určenej podľa autora Kirpicha [32, 33]:

$$t_c = K * L^{0,770} * S_r^{-0,385} \quad (2)$$

Kde:
t_c - čas koncentrácie [min]
K – faktor pre premenu jednotiek (pre metrický systém = 0,0195),
L – dĺžka hlavného toku [m],
S_r – priemerný sklon povodia [–].

Na základe času koncentrácie sa odhadla intenzita návrhového dažďa ($i_{D,N}$) pre dobu opakovania N = 100 rokov. V predloženej štúdií boli použité tri metódy stanovenia intenzity návrhového dažďa: rovnica Urcikán-Horváth [9, 34, 35], údaje z Národného klimatického programu SR NKP 17/22 (tzv.IDF krivky) [36] a údaje z Digitálneho atlasu návrhovej intenzity dažďa [37].

Druhá časť štúdie sa zoberá využitím priamej metódy v praxi. Séria zrážkovo-odtokových údajov meraná v dennom kroku (1989 – 2021) bolo rozdelené:

- pre povodie LM-JP na letnú (VI. – X.) a zimnú (XI. – V.) sezónu,
- pre povodie HO-P na letnú (V. – X.) a zimnú (XI. – IV.) sezónu.

V každom roku bola vybraná najväčšia (maximálna) povodňová vlna. Určenie povodňovej vlny a jej parametrov, akými sú začiatok a koniec vlny, jej vrchol a trvanie boli vykonané tzv. manuálnou

separáciou povodňových vĺn (pričom sa vlny separovali v programe FLOODSEP (verzia 1.0) [38]). Následne sa pre každú vlnu vypočítal objemový koeficient odtoku (φ_0). Pri výpočte vrcholového súčiniteľa odtoku sa vychádzalo rovnice [16,39]:

$$\varphi_0 = \frac{O_V}{H_Z} \quad (3)$$

$$\varphi_{v,N} = 2 * \frac{\varphi_0}{1+\left(\frac{t_p}{t_v}\right)} \quad (4)$$

Kde:
O_V - celkový kulminačný objem odtoku - priamy [mm],
H_Z - príčinné zrážky [mm],
$\varphi_{v,N}$ – vrcholový súčiniteľ odtoku [-],
φ_0 – objemový odtokový súčiniteľ odtoku [-],
tv – trvanie vzostupnej vetvy prietokovej vlny [hod],
tp – trvanie zostupnej vetvy prietokovej vlny [hod].

Pre štatistické spracovanie odtokových súčiniteľov bolo použité Johnsonove rozdelenie pravdepodobnosti [40,41]. V niektorých prípadoch museli byť vstupné údaje zredukované, nakoľko nespĺňali požadované nároky. Patrili sem niektoré povodňové vlny zo zimných mesiacov nakoľko ich vznik súvisel s topením jarného snehu a nie so zrážkami.

4. Výsledky práce

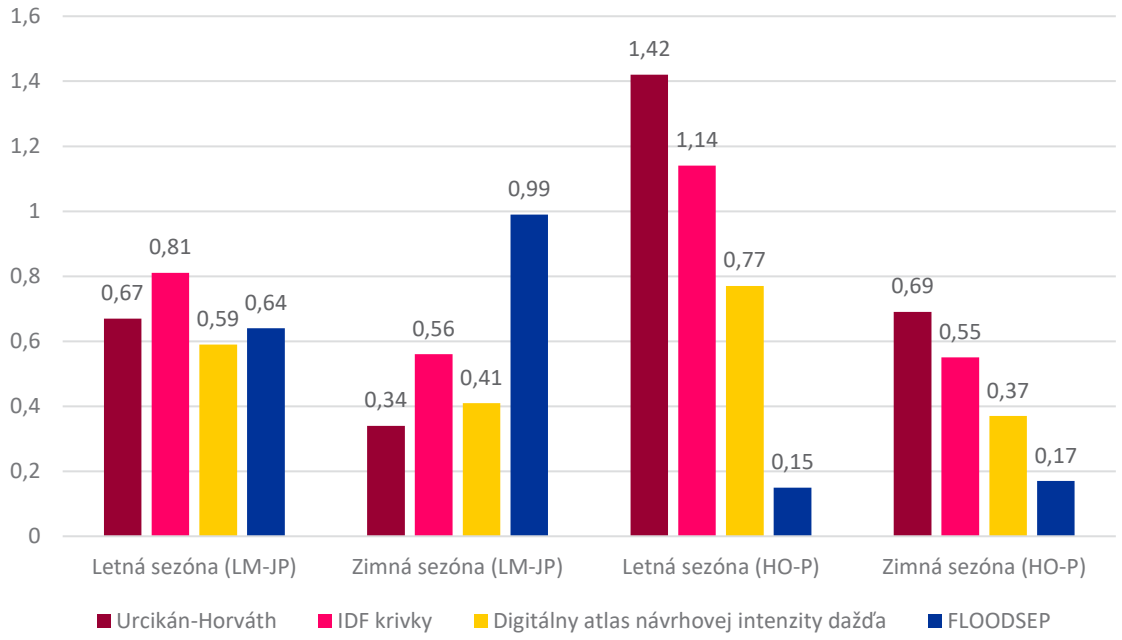
Výsledkom štúdie sú odhady koeficientov odtoku pre letnú a pre zimnú sezónu. Výsledné odhady sa pohybujú od 0,15 do 1,42. Najväčší odtokový koeficient vykazujú odhady podľa metódy Urcikán-Horváth a metóda IDF kriviek pre letnú sezónu.

Najnižšie odtokové koeficienty sa značne líšia. Čo sa týka výšky odhadu, najnižšie koeficienty vykazuje povodie HO-P pri použití priamej metódy. Jedno z vysvetlení je, že časový rad prietokov bol pre odhad φ_{100} boli krátke (33 rokov). V údajoch sú síce zachytené maximálne vlny, ale nemusia v nich byť zachytené extrémne udalosti, ktoré sa mohli v minulosti na povodí objaviť.

Čo sa týka sezóny, letné odhady prevažne prevyšujú zimné odhady. Výnimku tvorí priama metóda pri zimnej sezóne u povodia LM-JP. Povodie LM-JP výrazne ukazuje ako môže vplyv topiaceho snehu sa prejaviť vo výslednom odhade.

Pre porovnanie odhadov nepriamej a priamej metódy bol vytvorený graf zobrazený na Obrázku 2. Na základe výsledných odhadov je vidieť, že nepriama metóda nadhodnocuje výsledné hodnoty. Rozdiel pri nížinnom povodí HO-P je v niektorých prípadoch až desaťnásobný.

Výsledky ukazujú, že priama metóda sa viacej približuje k reálnym hodnotám vyplývajúce s charakteru povodia. Sú však potrebné ďalšie štúdie pre zistenie ako sa odhadnuté údaje približujú možným extrémom.



Obrázok 2: Porovnanie odhadnutého súčiniteľa odtoku pre dobu opakovania N = 100 rokov

5. Záver

Predložená štúdia poukázala na rozdiely medzi jednotlivými metódami odhadu. Výsledky priamej metódy sa vo väčšej miere približujú k reálnym hodnotám. Nevýhodou nepriamej metódy je, že neberie do úvahy konkrétne charakteristiky povodia, ktoré môžu výrazne ovplyvniť výsledný odhad. Zároveň však nemožno tvrdiť, že časové rady zrážkovo-odtokových údajov zachytia všetky možné extrémy. Príkladom je povodie HO-P, kde si nemôžeme byť istí, či všetky zaznamenané maximálne povodňové vlny zodpovedajú skutočne maximálnym možným vlnám. Hoci sa tieto údaje môžu približovať reálnym hodnotám, výsledný odhad môže výrazne podhodnotiť extrémne situácie. Ďalším problémom je, že mnohé povodia nedisponujú dostatočne dlhými alebo úplnými radmi zrážkovo-odtokových údajov. V takýchto prípadoch zostáva výsledný odhad vo veľkej miere závislý od subjektívneho hodnotenia povodia. Získané výsledky prispievajú k lepšiemu pochopeniu toho, do akej miery je potrebné zohľadňovať vybrané faktory tvorby odtoku pri odhadoch odtokových súčiniteľov na povodí a aký vplyv môžu mať na presnosť výsledkov.

Poďakovanie

Táto práca bola podporená projektom Program na podporu mladých výskumníkov (AVSOS), a VEGA 2/0115/25.

Literatúra

[1] BRUTSAERT, W. Hydrology: An Introduction [online]. 1. vyd. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 618 s. ISBN 9780521824798.

[2] DUFFY, C.J. The terrestrial hydrologic cycle: an historical sense of balance. In Wiley Interdisciplinary Reviews: Water [online]. 2017. Vol. 4, no. 4. [cit. 2024-05-16]. Dostupné na internete: <https://www.researchgate.net/publication/315830521_The_terrestrial_hydrologic_cycle_an_historical_sense_of_balance_The_terrestrial_hydrologic_cycle>.

[3] BLÖSCHL, G. et al. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective. In Hydrological Sciences Journal [online]. 2019. Vol. 64, no. 10, s. 1141–1158. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507>.

[4] BLÖSCHL, G. et al. Runoff Prediction in Ungauged Basins [online]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 465 s.

[5] BISWAS, A. History of Hydrology - Chapter 13: The Nineteenth Century. In History of Hydrology [online]. Amsterdam: North-Holland Publishing, 1970. s. 224–265. [cit. 2024-05-28]. ISBN 720480183Dostupné na internete: <https://thirdworldcentre.org/wp-content/uploads/2022/07/History-of-Hydrology-Asit-K.-Biswas.pdf>.

[6] DOOGE, J.C.I. Concepts of the hydrological Cycle. Ancient and modern. In International Symposium OH2 "Origins and History of Hydrology" [online]. 2001. s. 10. [cit. 2024-05-16]. Dostupné na internete: <https://web.archive.org/web/20141011185410/http://hydrologie.org/ACT/OH2/actes/03_dooge.pdf>.

[7] MULVANY, T.J. On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and of flood discharges in a given catchment. [s.l.]: Proceedings of the Institution of Civil Engineers of Ireland, 1851. 19–31 s.

[8] KUICHLING, E. The Relation Between the Rainfall and the Discharge of Sewers in Populous Districts. In American Society of Civil Engineers. Transactions . 1889. Vol. 20, no. 1, s. 60.

[9] ANTAL, J. et al. Hydrológia poľnohospodárskej krajiny (In Slovak. Hydrology of agricultural land). Nitra: Slovak University of Agriculture in Nitra, 2018. 371 s. ISBN 978-80-552-1820-5.

[10] HYDROLOGY STUDIO Rational Method. The Good, the Bad and the Ugly. In [online]. 2024. [cit. 2024-06-14]. Dostupné na internete: <https://www.hydrologystudio.com/rational-method/>.

[11] HYDROLOGY STUDIO Modified Rational Method Hydrographs. In [online]. 2024. [cit. 2024-06-18]. Dostupné na internete: <https://learn.hydrologystudio.com/studio-express/knowledge-base/modified-rational-method-hydrographs/>.

[12] CAREY, B.W. et al. Chapter 4 - The empirical version of the Rational Method. In Queensland Government Publications portal [online]. 2015. Dostupné na internete: <https://www.publications.qld.gov.au/dataset/e9116bae-b843-4b61-8050-433898222bd6/resource/74ff241c-8a97-40aa-a69d-52ab10219877/download/soilconguide3echapter4.pdf>.

[13] LAPIDES, D.A. et al. Implications of Distinct Methodological Interpretations and Runoff Coefficient Usage for Rational Method Predictions. In JAWRA Journal of the American Water Resources Association [online]. 2021. Vol. 57, no. 6, s. 859–874. Dostupné na internete: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1752-1688.12949>.

[14] LAPIDES, D.A. et al. Rational Method Time of Concentration Can Underestimate Peak Discharge for Hillslopes. In Journal of Hydraulic Engineering [online]. 2021. Vol. 147, no. 10, s. 6021014. Dostupné na internete: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0001900>.

[15] WORKING PARTY ON THE HYDRAULIC DESIGN OF STORM SEWERS Volume 1. Principles, methods and practice. In Design and analysis of urban storm drainage : the Wallingford procedure [online]. [s.l.]: National Water Council, Department of the Environment, 1983. s. 173. [cit. 2024-08-06]. ISBN 0901090271Dostupné na internete: <https://eprints.hrwallingford.com/37/1/Volume1_principles_methods_practice.pdf>.

[16] HRÁDEK, F. Aplikace genetického vzorce intenzivního typu pro výpočet kulminačných průtoků Q100 na malých povodí , Katedra základů vodního hospodařství. Praha: AF VŠZ, 1989.

[17] UNITED STATES. SOIL CONSERVATION SERVICE SCS National Engineering Handbook Section 4: Hydrology [online]. 1972. 734 s.

[18] NRCS Technical Release 55: Urban Hydrology for Small Watersheds. In USDA Natural Resource Conservation Service Conservation Engeneering Division Technical Release 55 [online]. 1986. [cit. 2024-05-20]. Dostupné na internete: <https://books.google.sk/books?id=LiJ46ycWdlQC&printsec=frontcover&hl=sk&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>.

[19] BAIAMONTE, G. SCS Curve Number and Green-Ampt Infiltration Models. In Journal of Hydrologic Engineering [online]. 2019. Vol. 24, no. 10, s. 4019034. Dostupné na internete: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001838>.

[20] BAIAMONTE, G. A rational runoff coefficient for a revisited rational formula. In Hydrological Sciences Journal [online]. 2020. Vol. 65, no. 1. [cit. 2024-06-05]. Dostupné na internete: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2019.1682150>.

[21] PETROSELLI, A. - GRIMALDI, S. Do we still need the Rational Formula? An alternative empirical procedure for peak discharge estimation in small and ungauged basins. In Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques [online]. 2015. Vol. 60. [cit. 2024-08-07]. Dostupné na internete: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2014.880546#d1e209>.

[22] YOUNG, C.B. - MCENROE, B.M. Evaluating the Form of the Rational Equation. In Journal of Hydrologic Engineering [online]. 2014. Vol. 19, no. 1, s. 265–269. Dostupné na internete: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0000769>.

[23] MERZ, R. - BLÖSCHL, G. A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment characteristics in Austria. In Water Resources Research [online]. 2009. Vol. 45, no. 1, s. n/a-n/a. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1029/2008WR007163>.

[24] YOUNG, C.B. et al. Empirical Determination of Rational Method Runoff Coefficients. In Journal of Hydrologic Engineering [online]. 2009. Vol. 14, no. 12, s. 1283–1289. Dostupné na internete: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0000114>.

[25] DHAKAL, N. et al. Return Period Adjustment for Runoff Coefficients Based on Analysis in Undeveloped Texas Watersheds. In Journal of Irrigation and Drainage Engineering . 2013. Vol. 139, no. 6, s. 476–482.

[26] WONG, T.S.W. Call for Awakenings in Storm Drainage Design. In Journal of Hydrologic Engineering [online]. 2002. Vol. 7, no. 1, s. 1–2. Dostupné na internete: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%291084-0699%282002%297%3A1%281%29>.

[27] FISCHER, S. et al. A statistics-based automated flood event separation. In Journal of Hydrology X [online]. 2021. Vol. 10. [cit. 2024-05-23]. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589915520300213?via%3Dihub>.

[28] MERZ, R. et al. Spatio-temporal variability of event runoff coefficients. In Journal of Hydrology [online]. 2006. Vol. 331, no. 3, s. 591–604. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169406003192>.

[29] GIANI, G. et al. A Practical, Objective, and Robust Technique to Directly Estimate Catchment Response Time. In Water Resources Research [online]. 2021. Vol. 57, no. 2, s. e2020WR028201. Dostupné na internete: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020WR028201>.

[30] ZHANG, Q. et al. Automatic procedure for selecting flood events and identifying flood characteristics from daily streamflow data. In Environmental Modelling & Software [online]. 2021. Vol. 145, s. 105180. Dostupné na internete: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136481522100222X>.

[31] FISCHER, S. - SCHUMANN, A. Type-Based Flood Statistics. An Interlink Between Stochastic and Deterministic Flood Hydrology [online]. [s.l.]: Springer Cham, 2023. 275 s. ISBN 978-3-031-32710-0.

[32] KIRPICH, Z.P. Time of concentration of small agricultural watersheds. In Journal of Civil Engineering . 1940. Vol. 10, no. 6, s. 362.

[33] CIVILWEB SPREADSHEETS Kirpich Formula. In [online]. 2024. [cit. 2024-03-15]. Dostupné na internete: <https://civilweb-spreadsheets.com/drainage-design-spreadsheets/runoff-and-rainfall-intensity-calculator-spreadsheet/kirpich-formula/>.

[34] URCIKÁN, P. - IMRIŠKA, L. Stokovanie a čistenie odpadových vôd. Tabuľky na výpočet stôk. (In Slovak. Sewerage and waste water treatment. Tables for sewer design.). Bratislava: Alfa, 1986. 237 s.

[35] URCIKÁN, P. - HORVÁTH, J. Matematické závislosti intenzít krátkodobých náhradných dažďov v Slovenskej socialistickej republike. Bratislava: Slovak University of Technology, 1979. 113 s.

[36] ONDERKA, M. - PECHO, J. Národný klimatický program Slovenskej republiky, Zväzok 17/22. Návrhové hodnoty intenzít krátkodobých dažďov na Slovensku - lokálne odhady. (In Slovak. National Climate Program of the Slovak Republic, Volume 17/22. Design values of short-term rain intensities in Slovakia - local estimates). Bratislava: Slovak Hydrometerological Institute, 2022. ISBN 978-80-99929-40-2.

[37] ONDERKA, M. et al. Digital atlas of rainfall design intensities in Slovakia. In [online]. 2023. Vol. 26, s. 27–38. [cit. 2024-03-16]. Dostupné na internete: <https://www.shmu.sk/File/met_cas/RR/2023-1_3%20Onderka.pdf>.

[38] VALENT, P. FloodSep: užívateľská príručka. Verzia 1.0 (In Slovak. FloodSep: user manual. Version 1.0). Bratislava, 2019. 55 s.

[39] KOHNOVÁ, S. et al. On the regionalization of runoff coefficient for the rational formula in small catchments of Slovakia. In Acta Hydrologica Slovaca [online]. 2005. Vol. 6, no. 1, s. 107–116. Dostupné na internete: <http://www.uh.sav.sk/ah_articles/2005_6_1_Kohnova_107.pdf>.

[40] WOLFRAM JohnsonDistribution. In Wolfram Language & System [online]. 2016. [cit. 2024-08-14]. Dostupné na internete: <https://reference.wolfram.com/language/ref/JohnsonDistribution.html>.

[41] JOHNSON, N.L. Systematic probability distributions by the use of the inverse functions. In Biometrika . 1949. Vol. 36, no. 1/2, s. 149–197.

Adela Rutzká[1]
Študijný program: vodohospodárske inžinierstvo, ročník: druhý

KOMBINOVANÉ NUMERICKÉ A FYZIKÁLNE MODELOVANIE PRÚDENIA V PRÍRODE BLÍZKOM RYBOVODE

COMBINED NUMERICAL AND PHYSICAL FLOW MODELING IN NATURE-LIKE FISH PASS

Abstract
The paper presents a combined approach to studying the hydraulic behaviour of the nature-like fish pass of Veľké Kozmálovce water structure. Based on photogrammetrically acquired terrain data, a 1D numerical model was created in HEC-RAS, complemented by a 3D physical model at a scale of 1:12.5. Comparison of water levels at reference points showed high agreement, with minimal deviations quantified by statistical indicators. Results demonstrate that the numerical model is reliable for preliminary flow assessment, while the physical model provides detailed visualization and validation of flow patterns. This approach supports the design, optimization, and monitoring of fish passes, thereby enhancing the understanding of hydraulic processes and improving fish migration efficiency.

Kľúčové slová
rybovod; fotogrametria; numerické modelovanie; fyzikálny model

1. Úvod

1.1 Všeobecný úvod do problematiky rybovodov

Priečne stavby na vodných tokoch, ako hate či priehrady, narúšajú prirodzené fungovanie riečnych ekosystémov. Ich výstavbou sa prerušuje pozdĺžna kontinuita toku, čím sa obmedzuje transport vody, sedimentov a živín, migrácia rýb a iných vodných organizmov, spomaľuje sa prúdenie vody a menia sa chemické aj biologické vlastnosti vody [1,2]. Fragmentácia riečnych systémov ďalej znižuje transport organickej hmoty, dostupnosť potravy a genetickú rozmanitosť populácií [2,3]. Na území Slovenska sa nachádza viac než 1000 bariér, z ktorých vyše 200 bolo označených ako prioritné pre spriechodnenie [4].

Rybovody predstavujú technické riešenie umožňujúce migráciu vodných organizmov proti i po prúde a tým obnovujú ekologickú kontinuitu [3,5,6]. Pri ich návrhu sa zohľadňuje rybie pásmo, migračná schopnosť, veľkosť a správanie druhov s cieľom zabezpečiť priechodnosť čo najväčšej časti populácie [3,7,8].

Rybovody možno rozdeliť na technické a prírode blízke. Technické typy, napríklad štrbinové rybovody, využívajú sériu stupňov alebo prepážok na rozptýlenie energie a umožňujú prechod cez bariéry, pričom sú efektívne pre mnohé druhy, no menej vhodné sú pre drobné či endemické ryby [9–15]. Prírode blízke rybovody napodobňujú prirodzené korytá s prirodzeným substrátom a variabilným prúdením, čím zlepšujú priechodnosť aj pre citlivé druhy a podporujú ekologickú konektivitu [9,16].

[1] Adela Rutzká, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra hydrotechniky, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava, adela.rutzka@stuba.sk

Výber typu rybovodu má zohľadniť ekologickú efektívnosť, technickú spoľahlivosť, morfológiu toku i spoločenskú akceptáciu [17].

1.2 Modelovanie rybovodov

Efektívnosť rybovodov závisí od presného pochopenia prúdových podmienok a ich optimalizácie podľa migračných schopností cieľových druhov rýb. Parametre ako hĺbka, zavodnená šírka, rýchlosť prúdenia, turbulencia a umiestnenie vstupu a výstupu určujú, či ryby dokážu rybovod úspešne prekonať [3,5,6,18].

Numerické modelovanie umožňuje simulovať prúdenie vody v rybovodoch, identifikovať kritické miesta a optimalizovať návrh tak, aby bol efektívny pre viacero druhov a rôzne prietoky. Používajú sa jednorozmerné a dvojrozmerné modely, najmä softvér HEC-RAS, ktorý poskytuje podklady pre kvantitatívne hodnotenie prúdových podmienok a následnú predikciu priechodnosti rybovodu ichtyológom [19–22]. Fyzikálne modelovanie predstavuje experimentálny prístup, pri ktorom sa prúdenie vody a funkčnosť rybovodu skúmajú na zmenšenom modeli v laboratórnych podmienkach. Umožňuje overiť výsledky numerických simulácií, pozorovať hydraulické javy a optimalizovať návrh ešte pred realizáciou v teréne [18,19].

Moderné prístupy kombinujú technické riešenia s prírode blízkymi prvkami, čo umožňuje bezpečnú migráciu rýb, obnovuje ekologickú kontinuitu tokov a podporuje zachovanie biodiverzity [7,8,13,18].

1.3 Prehľad metód získavania terénnych dát

Tradičné metódy získavania terénnych dát, ako meranie pomocou totálnej stanice (TS) alebo systému GNSS (globálny navigačný satelitný systém) s technológiou RTK (kinematika v reálnom čase), sú presné a spoľahlivé, avšak časovo náročné a menej vhodné pre rozsiahle či ťažko prístupné územia [23]. V posledných rokoch ich dopĺňajú moderné diaľkové technológie, ako fotogrametria a laserové skenovanie (LiDAR), ktoré umožňujú efektívne získavať husté mračná bodov s vysokou geometrickou presnosťou [24].

Fotogrametria, založená na princípoch Structure-from-Motion (SfM) a Multi-View Stereo (MVS), využíva prekrývajúce sa snímky z rôznych perspektív na rekonštrukciu 3D modelu terénu [25]. Rozvoj bezpilotných leteckých systémov (UAV/UAS) výrazne zefektívnil tento proces – drony vybavené kamerami a GPS dokážu zbierať presné georeferencované dáta s vysokým rozlíšením, čo umožňuje rýchlu tvorbu digitálnych modelov povrchu (DSM), reliéfu (DEM) či ortomozaík [26]. UAV fotogrametria tak spája presnosť terénnych meraní s plošným pokrytím diaľkového snímania a predstavuje flexibilné, nákladovo efektívne riešenie [27,28].

Jej hlavnou výhodou je schopnosť detailne zachytiť členitý reliéf, napríklad v oblasti rybovodov, kde presnosť tvaru topografie koryta rybovodu výrazne ovplyvňuje výsledky hydraulického modelovania. Fotogrametria umožňuje pokrytie väčších území v krátkom čase, pričom presnosť závisí od hustoty mračna bodov, prekrývania snímok a svetelných podmienok [24,28]. Hoci spracovanie rozsiahlych datasetov môže byť náročné, moderné softvérové nástroje tento proces výrazne automatizujú a zrýchľujú [25].

1.4 Hlavný cieľ

Hlavným cieľom tejto práce je využiť podrobné terénne dáta získané fotogrametriou na modelovanie prúdenia v rybovode a porovnať výsledky z rôznych prístupov. Získané mračná bodov slúžia ako podklad pre numerický 1D model prúdenia v prostredí HEC-RAS a sú zároveň použité na tvorbu fyzikálneho 3D modelu rybovodu vytvorenom pomocou 3D tlače. Takéto prepojenie umožňuje porovnať prúdenie v numerickom a fyzikálnom modeli a overiť presnosť simulácií

vzhľadom na geometrické detaily terénu. Výsledky je možné porovnať s meraniami in situ, čím sa získa komplexnejší pohľad na prúdenie v reálnych podmienkach.

2. Riešenie problematiky

2.1 Lokalita štúdie – rybovod Veľké Kozmálovce

Študovaná lokalita sa nachádza na rieke Hron v rkm 73,400, kde je situovaná vodná stavba (VS) Veľké Kozmálovce. Toto územie je z ichtyologického hľadiska zaradené do mrenového pásma, ktoré predstavuje stredný úsek toku (epipotamal) [29]. Vodné dielo Veľké Kozmálovce pozostáva z hate, malej vodnej elektrárne s troma Kaplanovými turbínami a rybovodu, ktorý bol uvedený do prevádzky v roku 2019 na zabezpečenie pozdĺžnej kontinuity toku (Obr. 1) [30]. Rybovod je prírode blízkeho charakteru, navrhnutý ako otvorený bezbariérový kanál, ktorý napodobňuje prirodzené riečne prostredie [31]. Koryto má miskovitý priečny profil – hlbšia časť sústreďuje hlavný prúd, zatiaľ čo plytšia časť poskytuje nižšie hĺbky a rýchlosti vhodné pre menej zdatné druhy.

Obr. 1 Rybovod – VS Veľké Kozmálovce

2.2 Získanie a spracovanie terénnych dát

Rybovod na VS Veľké Kozmálovce bol zameraný fotogrametricky pomocou bezpilotného lietadla (UAV – Unmanned Aerial Vehicle). Použitý bol dron DJI Mavic 3, ktorý lietal vo výške približne 6 m nad kanálom. Merania prebehli počas plánovanej odstávky rybovodu, keď bol rybovod čiastočne vyprázdnený, pretože fotogrametria nedokáže zachytiť morfológiu dna pod vodou (Obr. 2) [32]. Celkovo bolo nasnímaných 1 068 záberov z vertikálnych a šikmých uhlov, pričom pre tvorbu mračna bodov bolo využitých 400 vertikálnych snímok. Na doplnenie detailov pod mostami boli použité aj terestriálne fotografie [33].

Obr. 2 Vypustený rybovod pri fotogrametrickom zameriavaní

Na spracovanie snímkových dát bol použitý softvér Agisoft Metashape, ktorý umožnil automatickú identifikáciu zhodných bodov, tvorbu hustého mračna bodov a následné georeferencovanie pomocou pozemných referenčných bodov. Výsledkom bolo mračno bodov pozostávajúce z 278 miliónov bodov, zachytávajúce geometrické a farebné vlastnosti rybovodu s vysokou presnosťou [34]. Pre ďalšie spracovanie bol vybraný 100-metrový úsek rybovodu v priamej časti trasy obsahujúci približne 46 miliónov bodov, ktorý slúžil ako podklad pre tvorbu rastrového modelu terénu vhodného pre hydraulické modelovanie.

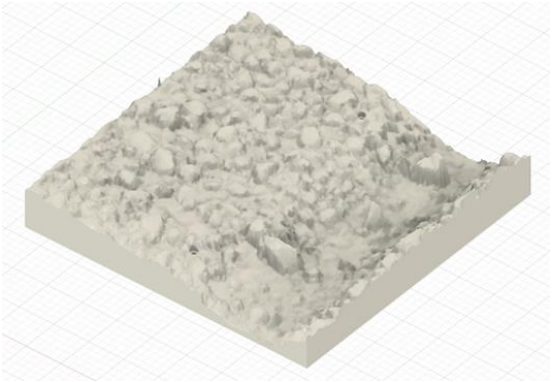
2.2.1 Príprava dát pre numerický model

Vybraný segment bol spracovaný v programe CloudCompare, kde bolo potrebné doplniť chýbajúce časti a vyhladiť nerovnosti prostredníctvom tvorby trojuholníkovej siete (mesh). Z tejto siete bolo opätovne generované upravené mračno bodov, ktoré presne reprezentovalo reliéf dna rybovodu.

Z tohto mračna bol vytvorený rastrový digitálny model terénu (DMT), ktorý slúžil ako podklad pre tvorbu 1D numerického modelu v HEC-RASe. DMT poskytuje základnú informáciu o reliéfe, z ktorej sa definujú stredová os koryta, línie brehov a priečne profily. Výškové profily sa pritom získavajú priamo z nameraného terénu, čo zabezpečuje, že geometria modelu vychádza zo skutočných dát, nie z interpolovaných hodnôt. Takto pripravený podklad umožňuje vykonanie simulácií prúdenia a výšok hladiny v závislosti od zadaných okrajových podmienok.

2.3 Návrh a príprava 3D modelu

Pre tvorbu fyzikálneho modelu rybovodu na VS Veľké Kozmálovce bolo mračno bodov spracované v softvéri Autodesk Civil 3D, kde bolo premenené na súvislý trojrozmerný model (solid) vhodný pre 3D tlač. Pri spracovaní bola vytvorená trojuholníková sieť (TIN), boli doplnené chýbajúce časti a vyhladené nepravidelnosti povrchu, aby výsledný model verne vystihoval topografiu rybovodu. Model bol následne upravený v softvéri Fusion 360, rozdelený na menšie segmenty podľa možností tlačiarne a exportovaný vo formáte STL, ktorý popisuje povrch prostredníctvom trojuholníkových prvkov (Obr. 3).



Obr. 3 Segment rybovodu pripravený na tlač v 3D tlačiarni

Model bol navrhnutý podľa Froudovho kritéria modelovej podobnosti v mierke 1 : 12,5, ktorá spĺňa podmienky hydraulickej podobnosti a umožnila umiestnenie modelu do sklopného žľabu hydrotechnického laboratória Katedry hydrotechniky na Stavebnej fakulte v Bratislave. Modelovaný úsek predstavoval priamu časť rybovodu s reálnou dĺžkou 25 m a šírkou 5 m. Fyzikálny model bol použitý na overenie možnosti využitia detailného 3D reliéfu pre stanovenie hydraulických charakteristík, najmä priebehu hladiny.

Merania sa realizovali pri známom prietoku, ktorý bol určovaný magneticko-indukčným prietokomerom, pričom polohy hladiny sa merali hrotovým meradlom s presnosťou 0,1 mm. Výsledky z fyzikálneho modelu boli porovnané s terénnymi meraniami in situ a s výstupmi numerického modelovania, čím sa overila vhodnosť 3D tlačeného modelu pre experimentálne hydraulické analýzy.

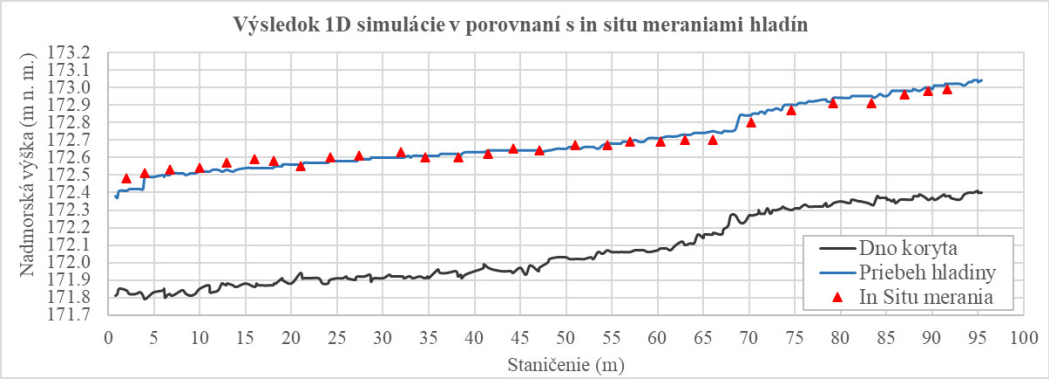
3. Výsledky

3.1 Výsledky 1D numerického modelu

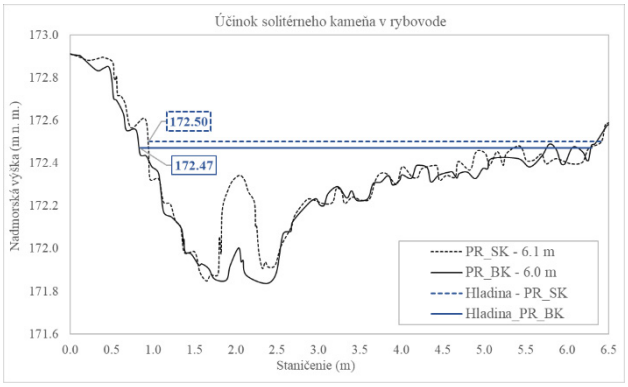
Numerický model rybovodu na VS Veľké Kozmálovce bol vytvorený v prostredí HEC-RAS 6.6 ako 1D model ustáleného nerovnomerného prúdenia. Kľúčovým faktorom hydraulických pomerov je tvar a morfológia kamenitého dna so solitérnymi balvanmi rôznych rozmerov, ktoré ovplyvňujú rozloženie rýchlostí a výšku hladiny. Pri definovaní geometrie modelu boli priečne rezy umiestnené tak, aby zachytili tieto morfologické prvky. Model bol vytvorený na základe digitálneho modelu reliéfu s rozlíšením 1 cm, čo umožnilo presnú reprezentáciu tvaru dna.

Na základe kalibrácie modelu s použitím údajov z merania in situ (prietok Q = 0,972 $m^3 \cdot s^{-1}$ a dolná okrajová podmienka hladina 172,47 m n. m.) bola zistená hodnota Manningovho súčiniteľa drsnosti n = 0,027 [35], čo podľa hydraulických tabuliek zodpovedá mierne drsnému štrkovému korytu s menšími nerovnosťami dna. Model riešil ustálené riečne prúdenie, pri ktorom sa predpokladá časová nemennosť prietoku a hladiny.

Výsledný pozdĺžny profil hladiny (Obr. 4) zobrazuje kolísanie výšky v závislosti od morfológie dna a polohy solitérnych kameňov. Tieto prvky lokálne zmenšujú prietočný prierez a spôsobujú zavzdutie hladiny (Obr. 5), ktoré je znázornené na porovnaní dvoch priečnych rezov: jeden v staničení 6,0 m na 1D modeli tesne pred solitérnym kameňom a druhý v staničení 6,1 m prechádzajúci solitérnym kameňom. Medzi týmito prvkami dochádza k zvýšeniu rýchlosti a miernemu poklesu hladiny. Takéto striedanie hlbších a plytších úsekov je typické pre prírode blízke rybovody, čím sa podporuje diverzita akvatických habitatov a migrácia rýb pri rôznych prietokoch.



Obr. 4 Priebeh hladiny v rybovode na základe simulačného scenára 1D numerického modelu v porovnaní s meranými hladinami in situ



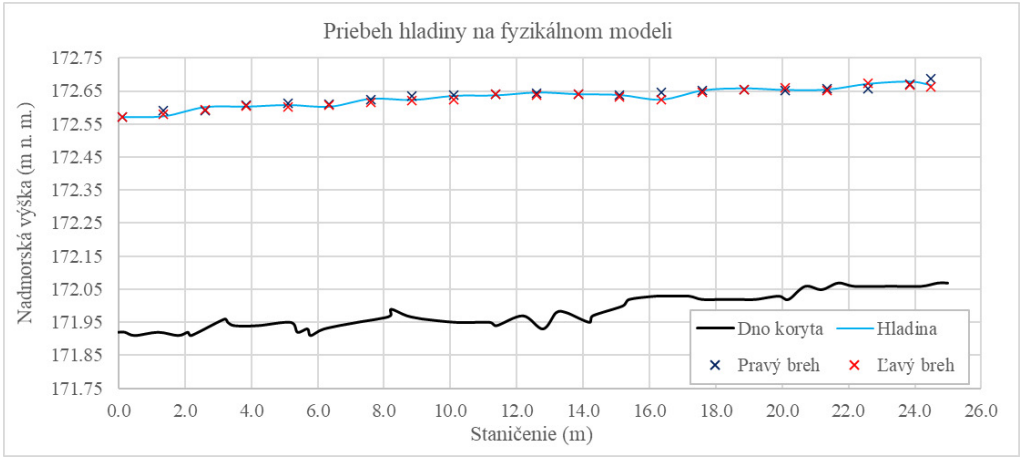
Obr. 5 Vzdutie hladiny vplyvom solitérneho kameňa v rybovode
(Vysvetlivka: PR = Priečny rez, SK = S kameňom, BK = Bez kameňa)

Výsledky ukazujú, že 1D model aj napriek svojej zjednodušenej dimenzii dokáže dostatočne zachytiť priebeh hladiny a vplyv morfologických prvkov na hydraulické pomery, pokiaľ je geometria modelu definovaná s dostatočnou hustotou priečnych rezov a správne kalibrovanými parametrami drsnosti.

3.2 Výsledky meraní na 3D fyzikálnom modeli

Na porovnanie s numerickou simuláciou bol v hydrotechnickom laboratóriu Stavebnej fakulty v Bratislave zhotovený fyzikálny model rybovodu na VS Veľké Kozmálovce v mierke 1 : 12,5. Experiment prebiehal pri prietoku Q = 0,972 $m^3 \cdot s^{-1}$, prepočítanom podľa Froudovho kritéria podobnosti (MQ = 552) na modelový prietok Q_m = 1,8 $l \cdot s^{-1}$. Dodržané boli pomerové závislosti medzi dĺžkovou a výškovou mierkou v súlade s princípmi hydrodynamickej podobnosti. Po ustálení prúdenia boli hladiny merané v troch pozdĺžnych líniách – v osi hlbočiny, pri pravom a ľavom brehu. Merania sa vykonávali v intervaloch 10 cm na modeli (1,25 m v skutočnom rybovode), čo pokrylo 25 m dlhý úsek. V každom profile bola zaznamenaná výška hladiny v troch charakteristických bodoch.

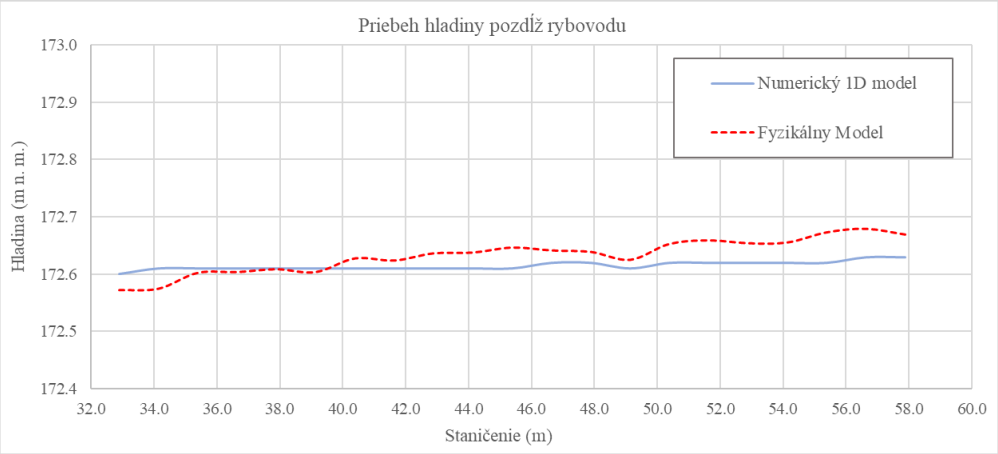
Namerané dáta preukázali plynulý priebeh hladiny s kolísaním zodpovedajúcim morfológii dna (Obr. 6). Odchýlky medzi líniami merania (pravý/ľavý breh, hlbočina) sú spôsobené asymetriou priečneho profilu a nerovnomerným rozdelením prietoku, čo potvrdzuje, že fyzikálny model reprodukuje prúdenie konzistentne a realisticky.



Obr. 6 Merania na fyzikálnom modeli znázorňujúce priebeh hladiny v hlbočine a hladiny zmerané na pravom a ľavom brehu

3.3 Porovnanie výsledkov

Na Obrázku 7 sú znázornené výšky hladiny v zhodných referenčných bodoch pre oba súbory dát – z 1D numerického modelu a z fyzikálneho modelu rybovodu. Keďže numerický model bol simulovaný na 100 m dlhom úseku priamej trate, zatiaľ čo fyzikálny model bol vytlačený len pre 25 m dlhý úsek, staničenie pre fyzikálny model bolo prevzaté z numerického modelu. Tento postup zabezpečil, že porovnanie hladín sa vykonáva v rovnakých bodoch po dĺžke rybovodu.



Obr. 7 Porovnanie priebehu hladín medzi 1D modelom a meraním na fyzikálnom modeli

Pre kvantitatívne porovnanie a validáciu zhody medzi 1D numerickým modelom a fyzikálnym modelom rybovodu, boli zvolené a vypočítané kľúčové štatistické metriky: BIAS (systematická chyba), PBIAS (percentuálna systematická chyba), MAE (stredná absolútna chyba) a RMSE (stredná kvadratická chyba). Tieto ukazovatele boli vybrané pre ich schopnosť poskytnúť komplexný pohľad na rôzne aspekty odchýlok medzi simulovanými a meranými hladinami, pričom každý z nich prináša špecifickú informáciu o charaktere zhody. Detailné hodnoty a jednotky týchto metrík sú prehľadne zhrnuté v Tabuľke 1.

Tab. 1 Výsledky štatistických ukazovateľov – porovnanie výsledkov medzi modelmi

Štatistický ukazovateľ	Výsledok	
BIAS	0.0177 m	1.77 cm
PBIAS	0.0103	1.03 %
MAE	0.0257 m	2.57 cm
RMSE	0.0292 m	2.92 cm

4. Záver

Porovnanie fyzikálneho modelu s referenčnými hodnotami získanými z 1D numerického modelu ukázalo vysokú mieru zhody. Hodnota BIAS = +0,0177 m a PBIAS = +1,03 % poukazujú na minimálny systematický posun, pričom fyzikálny model mierne nadhodnocuje hladinu. Nízke hodnoty MAE (0,0257 m) a RMSE (0,0292 m) svedčia o malej priemernej absolútnej odchýlke a rovnomernom rozložení chýb, čo potvrdzuje presnosť a stabilitu fyzikálneho modelu pri reprodukcii hladín 1D simulácie.

Výsledky jednoznačne preukazujú, že kombinácia numerického a fyzikálneho modelovania poskytuje robustný prístup k štúdiu hydraulického správania prírode blízkych rybovodov. 1D model slúži ako rýchly a spoľahlivý nástroj na predbežné posúdenie prietokových pomerov a overenie požadovaných parametrov. Fyzikálny model dopĺňa numerickú simuláciu o vizuálnu a dynamickú

interpretáciu prúdenia, umožňuje sledovať lokálne javy, ktoré sa v jednorozmernej simulácii nedajú zachytiť, a poskytuje overenie predpokladov numerického modelu.

Tento kombinovaný prístup má významný prínos pre navrhovanie, optimalizáciu a hodnotenie migračnej priechodnosti rybovodov, ako aj pre monitorovanie a modelovanie prúdenia v komplexných prírode blízkych podmienkach. Kombinované využitie presnosti numerických simulácií a detailného fyzikálneho modelovania zvyšuje spoľahlivosť rozhodnutí pri návrhu a úprave rybovodov a zároveň umožňuje lepšie porozumieť hydraulickým procesom, ktoré ovplyvňujú rozloženie rýchlostí a interakciu prúdu s členitosťou dna a jednotlivými prekážkami.

Poďakovanie:
Tento výskum bol podporovaný z grantu v rámci Programu na podporu mladých výskumníkov s názvom: Hydrotechnický fyzikálny výskum rybovodov s využitím cloudových dát a projektami výskumnej agentúry APVV-20-0023 a APVV-23-0447.

Literatúra:

[1] ADAMEC, M. – ANDREJI, J. – DERKA, T. – DOBIAŠ, T. – DRUGA, V. – GANSE, G. – VANKÚŠOVÁ, M.: Aktuálne problémy a škody v rybárstve. Slovenský rybársky zväz [online]. Žilina: PUBLISHING HOUSE, a. s., 2016, 1. vydanie, s. 27–37 [cit. 17. 10. 2025]. ISBN 978-80-971363-1-4. Dostupné na: https://www.ziverieky.sk/assets/Uploads/2060b81077/Skody_v_rybarstve_web_4.pdf

[2] ŠTÁTNA OCHRANA PRÍRODY SLOVENSKEJ REPUBLIKY – WEBMASTER: ŠOPSR – Spriechodňovanie migračných bariér [online]. Banská Bystrica: Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky, 2024 [cit. 17. 10. 2025]. Dostupné na: https://www.sopsr.sk/web/?cl=30383

[3] DRUGA, V.: Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky: Spriechodňovanie bariér na tokoch. Metodická príručka pre posudzovanie, navrhovanie a monitorovanie rybovodov [online]. Banská Bystrica: Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky, 2015 [cit. 17. 10. 2025]. Odborní garanti: J. Kadlečík, Z. Lichá. Manažér projektu: A. Grešková. Odborný konzultant: E. Hapl.

[4] ANON.: Na Slovensku je viac ako tisícka bariér pre migrovanie rýb [online]. Bratislava: Zoznam.sk, 2025 [cit. 17. 10. 2025]. Dostupné na: https://bleskovky.zoznam.sk/cl/1005001/2771733/Na-Slovensku-je-viac-ako-tisicka-barier-pre-migrovanie-ryb

[5] SILVA, A. T. – LUCAS, M. C. – CASTRO-SANTOS, T. – KATOPODIS, C. – BAUMGARTNER, L. J. – THIEM, J. D. – COOKE, S. J.: The future of fish passage science, engineering, and practice. Fish and Fisheries. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2018, roč. 19, č. 2, s. 340–362 [cit. 17. 10. 2025]. ISSN 1467-2960.

[6] O'CONNOR, J. – MALLEN-COOPER, M. – STUART, I.: Performance, operation and maintenance guidelines for fishways and fish passage works. Arthur Rylah Institute for Environmental Research Technical Report No. 262 [online]. Heidelberg: Department of Environment, Land, Water and Planning, 2015 [cit. 17. 10. 2025]. ISBN 978-1-74146-562-4 (pdf). Dostupné na: https://www.ari.vic.gov.au/__data/assets/pdf_file/0024/39453/ARI-Technical-Report-262-Performance-operation-maintenance-guidelines-for-fishways-and-fish-passage-works.pdf

[7] SANZ-RONDA, F. J. – BRAVO-CÓRDOBA, F. J. – FUENTES-PÉREZ, J. F. – CASTRO-SANTOS, T.: Ascent ability of brown trout, Salmo trutta, and two Iberian cyprinids in a vertical

slot fishway. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems [online]. Lyon: EDP Sciences, 2016, roč. 417, s. 1–9 [cit. 17. 10. 2025]. ISSN 1961-9502.

[8] BRANCO, P. – MASCARENHAS, A. M. – DUARTE, G. – ROMÃO, F. – QUARESMA, A. – AMARAL, S. D. – SANTOS, J. M.: Vertical slot fishways: incremental knowledge to define the best solution. Biology, 2023, roč. 12, č. 11, s. 1431. ISSN 2079-7737.

[9] ČUBANOVÁ, L. – VIDOVÁ, A. – DUŠIČKA, P. – POLÁK, V.: A Physical and Hydraulic Model of a Technical Fish Pass. Slovak Journal of Civil Engineering, 2025, roč. 33, č. 1, s. 1–9. ISSN 1210-2709.

[10] AUTIER, V. – HEINDEL, J. A.: Technical Fishway Limitations and Common Misconceptions. Fisheries and Aquaculture Journal [online]. 2021, roč. 12, S5, s. 1–9 [cit. 21.10.2025]. Dostupné na: https://www.longdom.org/open-access/technical-fishway-limitations-and-common-misconceptions.pdf

[11] REDEKER, M.: Retrofitting Fish Passes: International Best Practice, Current Research and Foreseeable Developments. In: USSD Annual Conference 2019. Denver (CO, USA), 2019, s. 1–15 [online; cit. 21.10.2025]. Dostupné na: https://www.cdmsmith.com/-/media/White-Papers/20190217_Paper-USSD-Annual-Conference-2019_Redeker

[12] BAHARVAND, S. – LASHKAR-ARA, B.: Hydraulic design criteria of the modified meander C-type fishway using the combined experimental and CFD models. Ecological Engineering, 2021, roč. 164, s. 106207. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106207

[13] AHMADI, M. – KURIQI, A. – NEZHAD, H. M. – GHADERI, A. – MOHAMMADI, M.: Innovative configuration of vertical slot fishway to enhance fish swimming conditions. Journal of Hydrodynamics, 2022, roč. 34, č. 5, s. 917–933. ISSN 1001-6058.

[14] KUCUKALI, S. – HASSINGER, A.: An experimental investigation of flow resistance and turbulent flow in brush fish pass. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water Management, 2020, roč. 172, č. 5, s. 241–256. https://doi.org/10.1680/jwama.18.00019

[15] JAHANGIRI, N. – OZBEY, C. – KUCUKALI, S.: Numerical simulation of vertical slot-brush fish pass: porous media approach. Hydrobiologia, 2024, s. 1–15. ISSN 0018-8158.

[16] VIDOVÁ, A. – ČUBANOVÁ, L.: Variant proposal of the fish passage using technical and close to nature approach. In: 18th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Štrbské Pleso, Slovakia, 2024, s. 94–103.

[17] HÄMMERLING, M. – KAŁUŻA, T. – TYMIŃSKI, T. – PLESIŃSKI, K.: The Use of a Multi-Criteria Decision Analysis Method to Select the Most Favourable Type of Fish Pass in Mountainous Areas. Water, 2024, roč. 16, č. 21, s. 3118. ISSN 2073-4441.

[18] MITSOPOULOS, G. – THEODOROPOULOS, C. – PAPADAKI, C. – DIMITRIOU, E. – SANTOS, J. M. – ZOGARIS, S. – STAMOU, A.: Model-based ecological optimization of vertical slot fishways using macroinvertebrates and multispecies fish indicators. Ecological Engineering, 2020, roč. 158, s. 106081.

[19] MAO, X.: Review of fishway research in China. Ecological Engineering, 2018, roč. 115, s. 91–95.

[20] BAKI, A. B. – GOLPIRA, A. – RAMPINELLI, G. C. – PATRIZIO, L. – ZHU, Z. D.: Numerical modelling of nature-like fish passage using a 2D shallow water model. In: CSCE Annual Conference, Laval, Canada, 2019, s. 1–8.

[21] KUBRAK, M. – SMOLIŃSKI, B. – RIHA, R. – KODURA, A. – POPIELSKI, P. – JABŁOŃSKI, K.: The application of a minimum specific energy concept for a fish ladder design. Archives of Civil Engineering, 2022, roč. 68, s. 555–568.

[22] SCHNEIDER, M. – KOPECKI, I. – HÄGELE, T. – QUARESMA, A. – JOÃO COSTA, M. – BOAVIDA, I. – PINHEIRO, A. N. – RUTSCHMANN, P. – GEIGER, F. – JARNY, S. – SCHWARZWÄLDER, K. – RÜTHER, N. – SANZ-RONDA, J.: Fish-friendly Innovative Technologies for Hydropower. D3.3 Guidelines for fish behaviour assessment at HPPs. 2020, s. 1.

[23] FURBY, B. – AKHAVIAN, R.: A Comprehensive Comparison of Photogrammetric and RTK-GPS Methods for General Order Land Surveying. Buildings, 2024, roč. 14, č. 6, s. 1863. ISSN 2075-5309.

[24] KARDOŠ, M. a kol.: Accuracy of Forest Road Digital Terrain Models Captured Using Airborne and Mobile LiDAR and Photogrammetry. Advances in Geodesy and Geoinformation, 2025, s. e65. ISSN 2720-678X.

[25] DEUSDADO, L. D. – ROCHA, J.: A Review of Best Methods for 3D Scanning and Modeling of Terrain and Buildings Using Drones and Photogrammetry. In: IWAM 2025 [online]. 2024 [cit. 21.10.2025].

[26] DLAMINI, S. M. – OUMA, Y. O.: Large-Scale Topographic Mapping Using RTK-GNSS and Multispectral UAV Drone Photogrammetric Surveys: Comparative Evaluation of Experimental Results. Geomatics, 2025, roč. 5, č. 2, s. 25.

[27] GHAMARI, M. – RANGEL, P. – MEHRUBEOGLOU, M. – TEWOLDE, G. – SHERRATT, R. S.: Unmanned Aerial Vehicle Communications for Civil Applications: A Review. IEEE Access, 2022, roč. 10, s. 22113917. ISSN 2169-3536.

[28] LLABANI, A. – ABAZAJ, F.: Comparison of UAV-LiDAR and Aerial Photogrammetry in Rural Areas with High Vegetation. International Journal of Science and Engineering Science, 2024, roč. 8, s. 46–51.

[29] KAZANCI, N. et al.: Hirudinea (Annelida) species and their ecological preferences in some running waters and lakes. International Journal of Environmental Science and Technology. Tehran: Springer, 2015, roč. 12, č. 3, s. 1087–1096 [cit. 17.10.2025]. ISSN 1735-1472.

[30] REPASKÁ, G. – BÁŤA, T.: Vybrané aspekty kvality života obyvateľov v obci Veľké Kozmálovce. Geografické informácie. Nitra: Univerzita Konštantína Filozofa v Nitre, 2011, roč. 15, č. 2, s. 55–65 [cit. 17.10.2025]. ISSN 1337-9453.

[31] CABEX, s. r. o.: Technická správa: VS Veľké Kozmálovce, zabezpečenie pozdĺžnej kontinuity a spriechodnenie toku. Bratislava: CABEX, s. r. o., december 2014. 11 s.

[32] PARGIEŁA, K.: Optimizing UAV data acquisition and processing for photogrammetry: a review. Geomatics and Environmental Engineering, 2023, roč. 17, č. 3, s. 29–59.

[33] BARBA, S. – BARBARELLA, M. – DI BENEDETTO, A. – FIANI, M. – GUJSKI, L. – LIMONGIELLO, M.: Accuracy assessment of 3D photogrammetric models from an unmanned aerial vehicle. Drones, 2019, roč. 3, č. 4, s. 79. ISSN 2504-446X.

[34] RÁK, O. – SZILÁGYI, D.: Photogrammetry possibilities and rules focusing on architectural usage. Pollack Periodica, 2020, roč. 15, č. 1, s. 187–196. ISSN 1788-1994.

[35] RUTZKÁ, A.: Modelovanie prúdenia v rybovode s využitím detailných geometrických údajov získaných fotogrametrickým skenovaním. Diplomová práca. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2024, 49 s.

Validation of sentinel-3 snow cover fraction over Austria

Mitra Tanhapour
Department of Land and Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia

*Corresponding author e-mail: mitra.tanhapour@stuba.sk

Abstract

This study first validates a new snow cover product derived from the combined Sentinel-3 SLSTR and OLCI sensors against in-situ snow depth observations. It then examines how assimilating this product improves runoff and snow model performance in alpine and lowland catchments. Two calibration approaches are applied: a single-objective calibration focused on runoff alone and a multi-objective calibration that simultaneously optimizes runoff and snow. The analysis covers 188 catchments across Austria for the period 2017–2022. Sentinel-3 snow cover data showed high consistency with in-situ observations, with median overall accuracy by 96%. Assimilating this product in model calibration notably enhanced snow model performance by 98% in alpine and 68% in lowland catchments, while runoff improvements were minor and mostly confined to lowland regions.

Keywords: Sentinel-3 snow cover fraction, Rainfall-runoff modeling, Snow, Multiple objective calibration

1. Introduction

Snowmelt is a major source of runoff and groundwater recharge and plays a vital role in supporting ecosystems. However, monitoring and modeling snow processes in mountainous regions remain difficult due to spatial variability of snow cover and limited observations. Satellite observations offer a practical alternative, providing high-resolution, terrain-independent data for snow monitoring [1, 2].

Over the past decade, satellite-based observations have become increasingly important for monitoring snow cover. Among them, the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensors are widely used for regional mapping because of their daily temporal resolution and high spatial resolution of 500 m. Numerous studies have confirmed the high accuracy and consistency of MODIS snow cover data compared with other satellite products and in-situ snow depth measurements [3-5].

Remote-sensed snow observations are increasingly used in streamflow simulation. Several studies have shown that MODIS snow cover data enhances snow cover simulations without significantly improving runoff model performance.

In recent years, satellite-derived snow observations have been increasingly integrated into hydrological modeling and streamflow simulation. Numerous studies have validated hydrological models using MODIS snow cover data [6-8], one of the most widely applied snow products worldwide. Most findings indicate that assimilating MODIS snow data substantially improves snow cover simulations, with a limited impact on runoff performance. Parajka and Blöschl (2008a) assessed the usefulness of MODIS snow cover data for hydrological model validation in Austria and found a slight improvement in runoff simulation when MODIS data were included [2]. Similarly, Kiewiet et al. (2022) reported good agreement between simulated and observed snow depths but found no strong relationship between annual discharge and the fraction of precipitation falling as snow [9].

A limited number of studies have explored the use of alternative satellite snow products for runoff simulation. Ruelland (2024) demonstrated that calibrating rainfall-runoff models using combined objective functions for runoff, snow cover, and snow water equivalent (SWE) improved snow

simulations without reducing runoff efficiency [10]. Liu et al. (2015) found that integrating AMSR-E snow depth data with in-situ observations from Snow Telemetry (SNOTEL) networks and terrain aspect produced reliable snow and runoff predictions. However, these studies were generally limited to a small number of catchments [11].

As remote-sensed snow data often have limited impact on runoff model performance, small-sample studies may not fully capture their effects, which can also vary with catchment characteristics and observation periods. Therefore, this study evaluates the performance of the new Sentinel-3 snow cover fraction (SCF) product for hydrological model validation across 188 catchments and enables more robust and generalizable outcomes. In this context, the main contributions of this study are: (1) evaluating the accuracy of the Sentinel-3 snow cover product against in-situ snow depth measurements at 631 climate stations, and (2) assessing the potential of the Sentinel-3 snow cover fraction data to enhance runoff and snow model performance in alpine and lowland catchments, compared to a case without satellite data assimilation.

2. Case study

In this study, Austria was chosen as the study area, covering an area of approximately 84000 km². Annual precipitation varies from less than 400 mm in the east to around 3000 mm in the west (Fig. 1). Land use includes agriculture in lowlands, forests at mid-elevations, and Alpine vegetation with rocky surfaces at higher altitudes. To examine the role of snow cover fraction in improving runoff and snow model performance, a hydrological model was calibrated for 188 Austrian catchments. The catchment areas range from 13.7 to 6214 km², and the average slope varies from 1.7% to 53%. To separate the effects of climate and elevation on the results, all catchments were divided into two groups: lowland (91 catchments) with elevations below 900 m, and alpine (97 catchments) with elevations above 900 m.

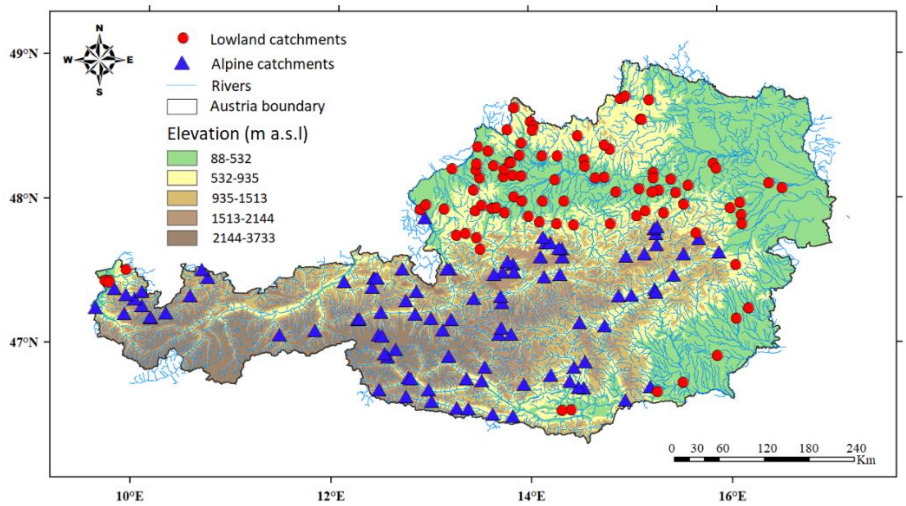


Figure 1: Location of the study area and distribution of selected alpine (blue) and lowland (red) catchments

3. Data

We used snow cover product from combined Sentinel-3 SLSTR&OLCI data, with a spatial resolution of 200 m. The in-situ snow data used in this study consist of daily snow depth measurements from 631 climate stations, covering the period from January 2017 to December 2023. Measurements were taken daily at 7:00 AM and recorded as integer values in centimeters. Daily runoff data were recieved by the Central Hydrographical Bureau. The climate variables, namely mean daily precipitation and temperature, were extracted from the gridded SPARTACUS dataset. It provides long-term daily gridded data at 1 km resolution, derived from a consistent station network. Mean daily potential evapotranspiration was estimated using the modified Blaney–Criddle method based on air temperature and potential sunshine duration. The data were processed and interpolated into 200 m

elevation zones. The precipitation, air temperature, and runoff data were available from September 1999 to December 2022.

4. Methodology

4.1. Accuracy assessment of Sentinel-3 snow cover fraction

The accuracy of the snow cover fraction product was evaluated against in-situ snow depth measurements to assess its reliability for hydrological applications. Satellite-derived snow depths were extracted for pixels corresponding to the locations of climate stations, which served as ground truth. To validate the snow cover product, two error indices were defined based on the approach described in [12]: the snow underestimation error (S_D^U), representing cases where snow is misclassified as land, and the snow overestimation error (S_D^O), representing cases where land is misclassified as snow. Both errors are expressed as percentages (%) below:

$$S_D^U = \frac{b}{a+b+c+d} \times 100 \quad (1)$$

$$S_D^O = \frac{c}{a+b+c+d} \times 100 \quad (2)$$

where a, b, c, and d denote the percentage of cloud-free days corresponding to correct or incorrect classifications for each category at each station, as presented in Table 1. The values of metrics were then aggregated over the entire study period for climate stations within each elevation zone as monthy. In this study, five elevation bands were considered, e.g., below 300 m, 300–600 m, 600–900 m, 900–1500 m, and above 1500 m.

The overall agreement between snow product and snow depth measurements was quantified using the overall accuracy index (A_o), defined as the percentage of correctly classified station-days (snow–snow and no snow–no snow) relative to the total number of cloud-free station-days:

$$A_o = \frac{a+d}{a+b+c+d} \times 100 \quad (3)$$

Table 1: Confusion matrix to estimate the overall accuracy, over- and underestimation errors of the satellite Sentinel-3 snow cover fraction

Station-Days	Sentinel-3: SNOW	Sentinel-3: NO-SNOW
Ground: SNOW	a	b
Ground: NO-SNOW	c	d

4.2. Hydrological model

A semi-distributed conceptual TUW hydrological model, based on the HBV framework, was used in this study. The model, widely applied across Europe and beyond, uses daily precipitation, mean air temperature, potential evapotranspiration, and discharge as inputs. It includes three main routines, i.e., snow, soil moisture, and runoff, and involves fifteen parameters. The snow routine applies a temperature threshold and degree-day method for snow accumulation and melt. The soil moisture routine simulates changes in the water content stored within the soil reservoir. The runoff routine involves the simulation of runoff generation and flow routing in rivers. More details on the model descriptions are provided in [13, 14].

4.3. Hydrological model calibration

The impact of the satellite snow product on model calibration was evaluated using two strategies: a single-objective calibration focused solely on runoff and a multi-objective calibration that simultaneously considered runoff and snow. In both cases, the overall objective function combined the runoff and snow components as a weighted sum (Eq. 4), with weight coefficients (Table 2) adopted from previous study [15].

$$OF_{Total} = W_q OF_q + W_s OF_S \quad (4)$$

Where W_q and W_s are weight coefficients for runoff and snow, respectively.

Table 2: Weight coefficients used for the calibration schemes

Calibration processes	Weight of runoff (W_q)	Weight of snow (W_s)
Single objective calibration to runoff alone	1	0
Multi-objective calibration to runoff and snow	0.5	$W_s = (1 - W_q)$

The runoff objective function OF_q is based on a combination of Nash-Sutcliffe coefficients [16], i.e., NSE and NSE_{Log}, which together represent the runoff model efficiency (RE), as expressed below:

$$OF_q = 1 - (0.5 \times NSE) + (0.5 \times NSE_{Log}) \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_s - Q_o)^2}{\sum(Q_o - \bar{O}_o)^2} \quad (6)$$

$$NSE_{log} = 1 - \frac{\sum(\log(Q_s) - \log(Q_o))^2}{\sum(\log(Q_o) - \log(\bar{Q}_o))^2} \quad (7)$$

where Q_s and Q_o are the simulated and observed discharge, respectively, and $\bar{Q}_o$ is the mean of observed discharge during calibration/validation periods.

The snow objective function OF_S involves the sum of snow overestimation (S_E^O) and underestimation (S_E^U) errors, averaged over the calibration/validation period, which served as snow model efficiency (SE), as defined below:

$$OF_S = (S_E^O + S_E^U) \quad (8)$$

To estimate S_E^O and S_E^U, this study follows the approach employed by Shrestha et al. (2014) and Tong et al. (2021) [7, 15]. It compares the snow water equivalent (SWE) simulated by the hydrological model with the snow cover area (SCA) derived from the satellite snow product. Snow model performance was then evaluated using a confusion matrix similar to the scheme presented in Table 1. Here, satellite-derived SCA, serving as reference values, was assessed against the SWE simulated by the hydrological model. Accordingly, the snow overestimation error (S_E^O) denotes the proportion of days when the model simulates snow cover that is not detected by the satellite, while the snow underestimation error (S_E^U) means the ratio of days when the hydrological model fails to reproduce observed snow cover.

As OF_q and OF_S are functions of goodness-of-fit measures, they are termed as runoff model efficiency (RE) and snow model efficiency (SE) in the rest of paper. The RE and SE metrics range from 0 to 1, with lower values indicating better model performance. Hence, the improvements in runoff (ΔRE) and snow (ΔSE) model efficiencies were computed using the equations presented below:

$$\Delta RE = RE_r - RE_{rs} \quad (10)$$

$$\Delta SE = SE_r - SE_{rs} \quad (11)$$

where the RE_r and RE_{rs} are the runoff model efficiencies corresponding to single objective calibration to runoff alone and multi-objective calibration to runoff and snow, respectively. Similarly, the SE_r and SE_{rs} are the snow model efficiencies corresponding to the same calibration approaches. Thus, positive values of ΔRE and ΔSE reflect improvements in runoff and snow model efficiencies,

whereas negative values indicate the opposite. The model was automatically calibrated over the period from 1 September 2017 to 31 August 2020 and validated from 1 September 2020 to 31 August 2022. The warm-up period begins one year prior to the start date of both the calibration and validation periods.

5. Results and discussion

5.1 Validation of Sentinel-3 snow cover fraction

Fig. 2 displays the spatial distribution of the overall accuracy of the snow cover fraction compared with in-situ snow depth observations. As shown in this figure, the overall accuracy exceeds 90% for all stations, except for a few located in alpine areas. Generally, the median overall accuracy of roughly 96% represents a substantial agreement between the Sentinel-3 snow cover fraction and ground snow depth observations.

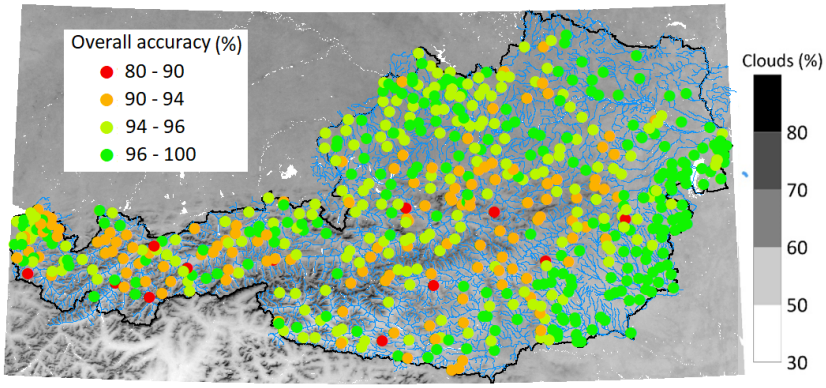


Figure 2: Spatial distribution of the overall accuracy of the snow cover fraction derived from the pixels against ground snow depth data during 2017–2022

Figure 3 illustrates the seasonal variations in overall accuracy, overestimation, and underestimation errors of the snow cover fraction across elevation zones. It is clear that overall accuracy decreases during the cold seasons and increases in warmer months. The pattern of variations is generally consistent across elevations, except for those above 900 m a.s.l., which show a sharp decline in accuracy during spring (March–April). This pattern appears to result from the overall snow cover in Austria. As mostly Austria is snow-free in summer, the probability of error is lower than in winter and spring. These findings are consistent with those reported by Parajka and Blöschl (2006) using MODIS snow cover data [5].

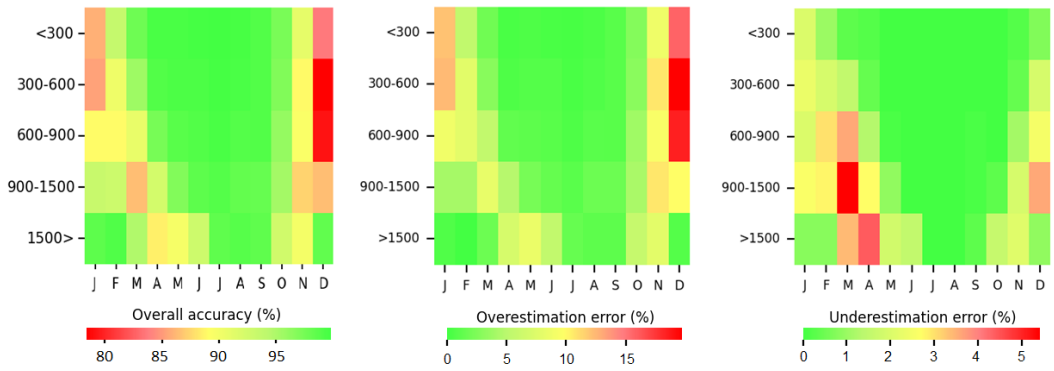


Figure 3: Seasonal distribution of the overall accuracy (A_o), over- and underestimation errors (S_D^O, S_D^U) of the snow cover fraction against ground snow depth data. The legend represents different elevation bands.

Regarding the overestimation and underestimation errors (central and right panels), the results primarily show that the magnitude of errors increases with elevation. This is likely because snow depth interpolation is less reliable in alpine regions, where sparse station coverage reduces its accuracy and strongly affects the error estimates. Moreover, the overestimation errors of the Sentinel-3 snow cover fraction are larger than the underestimation errors, especially in the cold seasons. This is caused by errors from liberal cloud mask applied in the snow mapping algorithms. As reported by Riggs et al. (2002), the liberal cloud mask tends to incorrectly label ice clouds as snow.

5.2. Evaluation of runoff and snow model efficiencies

Figure 4 presents the medians of the runoff and snow model efficiencies based on the calibration processes used in this study over all catchments in alpine and lowland areas. As mentioned before, the lower the values of runoff and snow model efficiencies, the better the model performance, which is shown in green in Figure 4.

Given the median of runoff efficiency in validation period, it can be seen that the median of RE varies from 0.44 to 0.43 in lowland catchments and from 0.26 to 0.31 in alpine catchments. It means that multiple objective calibration approach has a slight positive impact on runoff model efficiency for most catchments in lowland areas, whereas it reduces the runoff model efficiency in alpine regions. Moreover, the results show that in all the cases of the calibration schemes, the model demonstrates better performance in simulating runoff for alpine catchments than for lowland catchments. Accordingly, in alpine catchments, the RE index has improved by 41% for the single-objective calibration and by 28% for the multiple objective calibration methods compared to lowland catchments during the validation period.

Based on the median of snow model efficiency (SE), The SE index improved by 35% under the multi-objective calibration approach compared to single objective calibration method in hilly catchments during the validation period. It can be inferred that the multi-objective calibration method improves snow model efficiency compared to single objective calibration method for both groups of catchments, with a more pronounced improvement in alpine areas. Besides, regardless of the type of calibration process, the snow simulation errors are lower in plain areas than in mountainous regions, mostly due to the larger spatial variability of snow accumulation and melt processes in complex alpine areas. Besides, the results imply that the snow overestimation errors dominate over the underestimation errors.

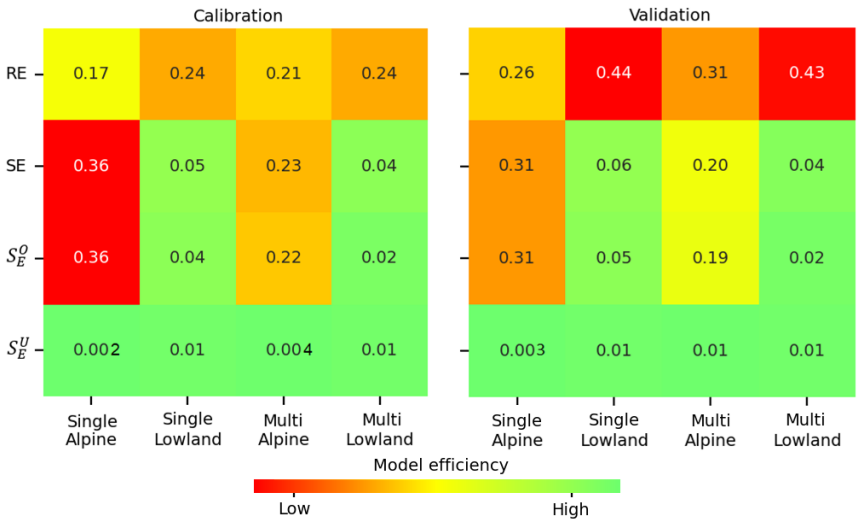


Figure 4: Median of the runoff and snow model efficiencies obtained for both groups of catchments (alpine and lowland catchments) based on calibration processes used. Green color represents higher model efficiency.

Figure 5 presents the spatial distribution of ΔRE and ΔSE, illustrating the improvements in runoff and snow model efficiencies obtained through the use of satellite snow products compared to simulations without satellite data. Improvements are highlighted in green. Table 3 illustrates the number of catchments with improvement in hydrological model efficiencies (RE and SE) for the validation period (2020–2022). Based on Figure 5, the rate of improvement in runoff efficiency in flatland areas is greater than in alpine regions. This outcome is supported by the results presented in Table 3 for runoff efficiency (RE), which demonstrate that the percentage of catchments with improvements in flatland areas is 31% higher than that in mountainous regions. This is because satellite snow cover products are affected by cloud cover, steep slopes, forest canopies, and terrain shadowing, which produce retrieval challenges in complex alpine terrains.
The results illustrate that the inclusion of snow products in model calibration enhances the snow model efficiency (SE) across both lowland and highland areas, with a more pronounced improvement observed in the highland regions (98% of alpine catchments). The reason arises from the fact that alpine regions experience more significant impacts by snow processes, e.g., accumulation, time of snowmelt, seasonal storage, which carry notable spatial and temporal variability over elevations. Hence, satellite snow observations enhance the consistency of snow-related parameters and apply uncertainty more effectively in alpine terrain, while the impact of snow in lowlands is minimal. Thus, adding snow data yields limited improvement. Theses outcomes are supported by similar studies [2, 5, 10].

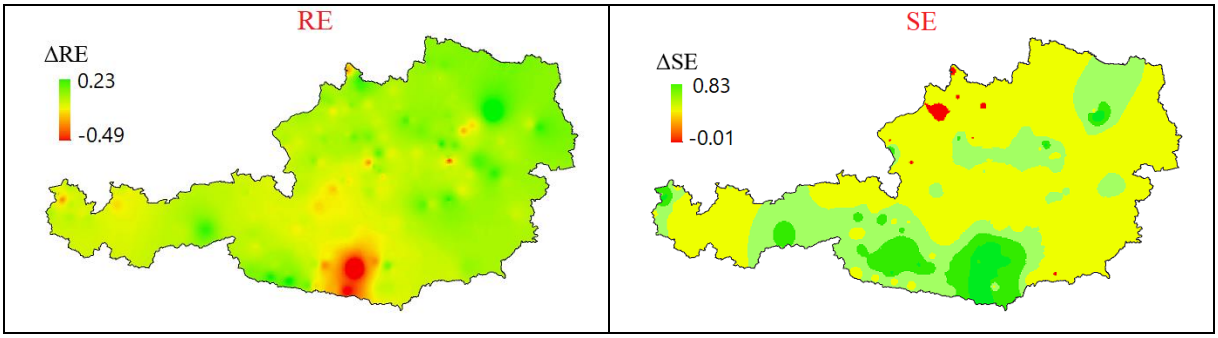


Figure 5: Spatial variability of improvements in runoff and snow model efficiencies for the multi-objective calibration compared to the single-objective calibration approach during the validation period (2020–2022). Improvements are shown in green.

Table 3: The percentage of catchments with improvement in runoff and snow efficiencies compared to the Runoff-only calibration process during validation period (2020-2022)

RE	**Alpine (97)**		**Lowland (91)**	
	No.	(%)	No.	(%)
	23	24	50	55
SE	**Alpine (97)**		**Lowland (91)**	
	No.	(%)	No.	(%)
	95	98	62	68

6. Conclusion

This study assessed the reliability of Sentinel-3 snow cover fraction data by comparing it with in-situ snow depth measurements and analyzing its contribution to hydrological model calibration. The key results are summarized below:
i. The median overall accuracy of approximately 96% indicates a strong consistency between the SCF and the ground-based snow depth observations.

ii. Incorporating SCF products in model calibration slightly improves model performance to simulate runoff in lowland areas (55% of lowland catchments).
iii. Although the snow cover fraction used in this study enhances both runoff and snow model performance, the improvement is more significant for snow model efficiency, especially in highland regions (98% of the alpine catchments).
Future work will extend this research by assimilating additional satellite snow products, e.g., MODIS and VIIRS, with varying spatial resolutions and testing alternative model calibration strategies. We also plan to conduct a study applying satellite-based snow and soil products in the Carpathian basins, which include both Slovakian and Austrian catchments.

Acknowledgements:

This study was financially supported by the EU NextGenerationEU through the recovery and resilience plan for Slovakia under the project No. 09I03-03-V05-00005.

References

1. Barnhart, T.B., et al., *Evaluating distributed snow model resolution and meteorology parameterizations against streamflow observations: Finer is not always better.* Water Resources Research, 2024. 60, 7, e2023WR035982. 0043-1397.

2. Parajka, J. and G. Blöschl, *The value of MODIS snow cover data in validating and calibrating conceptual hydrologic models.* Journal of hydrology, 2008a. 358, 3-4, 240–258. 0022-1694.

3. Doğan, Y.O., A.A. Şorman, and A. Şensoy, *Multi-criteria evaluation for parameter uncertainty assessment and ensemble runoff forecasting in a snow-dominated basin.* Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2023. 71, 3, 231–247. 0042-790X.

4. Gao, Z., et al., *Investigating spatial-temporal trend of snow cover over the three provinces of Northeast China based on a cloud-free MODIS snow cover product.* Journal of Hydrology, 2024. 645, 132044. 0022-1694.

5. Parajka, J. and G. Blöschl, *Validation of MODIS snow cover images over Austria.* Hydrology and Earth System Sciences, 2006. 10, 5, 679–689. 1607-7938.

6. Parajka, J., et al., *MODIS snow cover mapping accuracy in a small mountain catchment–comparison between open and forest sites.* Hydrology and Earth System Sciences, 2012. 16, 7, 2365–2377. 1027-5606.

7. Shrestha, M., et al., *Correcting basin-scale snowfall in a mountainous basin using a distributed snowmelt model and remote-sensing data.* Hydrology and earth system sciences, 2014. 18, 2, 747–761. 1607-7938. 1607-7938.

8. Sleziak, P., et al., *The effect of the snow weighting on the temporal stability of hydrologic model efficiency and parameters.* Journal of Hydrology, 2020. 583, 124639. 0022-1694.

9. Kiewiet, L., et al., *Effects of spatial and temporal variability in surface water inputs on streamflow generation and cessation in the rain–snow transition zone.* Hydrology and Earth System Sciences, 2022. 26, 10, 2779–2796. 1607-7938.

10. Ruelland, D., *Potential of snow data to improve the consistency and robustness of a semi-distributed hydrological model using the SAFRAN input dataset.* Journal of Hydrology, 2024. 631, 130820. 0022-1694.

11. Liu, Y., et al., *Blending satellite-based snow depth products with in situ observations for streamflow predictions in the Upper Colorado River Basin.* Water resources research, 2015. 51, 2, 1182–1202. 0043-1397.

12. Parajka, J. and G. Blöschl, *Spatio-temporal combination of MODIS images–potential for snow cover mapping.* Water resources research, 2008b. 44, 3, 1-13. 0043-1397.

13. Parajka, J., R. Merz, and G. Blöschl, *Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modelling: case study in 320 Austrian catchments.* Hydrological Processes: An International Journal, 2007. 21, 4, 435–446. 0885-6087.

14. Tong, R., et al., *The value of satellite soil moisture and snow cover data for the transfer of hydrological model parameters to ungauged sites.* Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2021b. 2021, 1–27. 1812-2116.

15. Tong, R., et al., *The value of ASCAT soil moisture and MODIS snow cover data for calibrating a conceptual hydrologic model.* Hydrology and Earth System Sciences, 2021a. 25, 3, 1389–1410. 1607-7938.

16. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe, *River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles.* Journal of hydrology, 1970. 10, 3, 282–290. 0022-1694.

Alexandra Vidová[1]
Študijný program: vodohospodárske inžinierstvo, ročník: tretí

SIMULÁCIA PRÚDENIA V TECHNICKOM ŠTRBINOVOM RYBOVODE

FLOW SIMULATION IN A TECHNICAL VERTICAL SLOT FISH PASS

Abstract
Vertical slot fish passes are widely used technical solutions for restoring river connectivity and enabling fish migration across artificial barriers. This study presents a mathematical simulation of flow in a technical vertical slot fish pass using the shallow water equations (SWE-ELM) implemented in HEC-RAS 6.5. The physical model, constructed and measured at the Water Research Institute in Bratislava, served as the basis for the computational domain. The simulation focused on testing the stability and functionality of the model. The results confirmed that the SWE-ELM equation provides stable and hydraulically consistent solutions, accurately capturing local accelerations and velocity distributions in the vicinity of the slots. The next phase of research will involve calibration against laboratory measurements for various flow rates and fish zones, as well as the evaluation of alternative geometric configurations to optimize hydraulic and ecological performance.

Kľúčové slová
štrbinový rybovod; HEC-RAS; SWE-ELM; hydrodynamický model; migrácia rýb; kalibrácia.

1. Úvod

Vodné stavby na jednej strane prinášajú spoločnosti benefity v podobe obnoviteľnej energie alebo protipovodňovej ochrany, ale na druhej strane predstavujú významný ekologický problém, ktorý negatívne ovplyvňuje populácie rýb a ďalších vodných organizmov. Výstavba priehrad, hatí a iných vodných stavieb narúša pozdĺžnu kontinuitu tokov a znemožňuje prirodzenú migráciu ichtyofauny medzi jednotlivými časťami riečneho systému [1-3]. Jedným z najefektívnejších technických riešení na obnovu migračnej priechodnosti sú štrbinové rybovody, ktoré umožňujú obojstrannú migráciu rýb rôznych veľkostí a druhov [4,5].

Správny návrh a dimenzovanie rybovodov vyžaduje detailné poznanie hydraulických pomerov v koryte rybovodu, keďže prúdenie vody, rozloženie rýchlostí a vznik prúdových tieňov priamo ovplyvňujú úspešnosť migrácie [6,7]. Moderné hydrodynamické modelovanie, najmä využitie 2D a 3D simulácií v softvéroch ako napr. HEC-RAS 2D alebo Flow-3D, umožňuje presnejšie analyzovať tieto javy a optimalizovať návrh s ohľadom na ekologické aj legislatívne požiadavky [8,9].

Cieľom tejto práce je overiť použiteľnosť a stabilitu rovníc plytkej vody (SWE-ELM) v programe HEC-RAS pri simulácii prúdenia v technickom štrbinovom rybovode. Geometria rybovodu je založená na fyzikálnom modeli postavenom v hydrotechnickom laboratóriu Výskumného ústavu vodného hospodárstva (VÚVH) v Bratislave. Práca nadväzuje na aktuálne trendy v oblasti matematického modelovania rybovodov a reflektuje potrebu kalibrácie modelu podľa experimentálnych meraní, ako aj hodnotenia rôznych geometrických variantov s cieľom zvýšiť hydraulickú účinnosť a ekologickú vhodnosť navrhovaných riešení.

[1] Alexandra Vidová, Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra hydrotechniky, Radlinského 2766/11, 810 05 Bratislava, alexandra.vidova@stuba.sk

2. Materiály a metódy

2.1 Ciele a teoretické východiská

V publikovaných prácach [10-12] boli porovnávané dve výpočtové rovnice v softvéri HEC-RAS - difúznej vlny (DWE) a rovnice plytkej vody (SWE-ELM). Cieľom bolo posúdiť ich vhodnosť pre simulácie prúdenia vody v prírode blízkom rybovode a porovnať ich výhody a obmedzenia. Výsledky potvrdili, že zatiaľ čo model DWE poskytuje stabilné riešenia pre jednoduchšie prúdenia s malými zmenami hybnosti, model SWE-ELM umožňuje podrobnejší opis hydraulických javov, a to najmä lokálne zrýchlenia, prúdové tiene a spätné prúdy za prekážkami, ktoré sú typické pre rybovody.

Overenie využitia rovníc plytkej vody SWE-ELM s modelovaním turbulencie pri simulácii prúdenia v technickom štrbinovom rybovode sa prepojí s validáciou numerického prístupu pri návrhu a optimalizácii geometrie rybovodu. Model SWE zachováva hmotnosť aj hybnosť prúdiacej vody a umožňuje výpočet dynamických účinkov, ktoré sú dôležité pre presné stanovenie energetického spádu a distribúcie rýchlostí v okolí štrbín. V HEC-RASe je táto metóda riešená implicitnou metódou konečných objemov, pričom efekt turbulencie sa zohľadňuje prostredníctvom pridaného člena turbulentnej viskozity v rovniciach hybnosti [9].

Cieľom tejto štúdie je overiť použiteľnosť a stabilitu modelu SWE-ELM s turbulenciou v programe HEC-RAS pri simulácii prúdenia v technickom štrbinovom rybovode. Tento model bude následne kalibrovaný menením Manningovho súčiniteľa drsnosti s cieľom dosiahnuť namerané parametre podľa meraní na fyzikálnom modeli z hydrotechnického laboratória VÚVH a porovnať parametre z fyzikálneho a matematického modelu, ako sú hĺbky a rýchlosti prúdenia v jednotlivých častiach rybovodu (oblasť štrbiny v prepážke, resp. bazéna medzi prepážkami).

2.2 Štrbinový rybovod

Štrbinový rybovod patrí medzi technické typy bazénových rybích priechodov, v ktorých sú jednotlivé komory oddelené prepážkami s vertikálnymi štrbinami. Štrbiny sú otvorené od dna až po hladinu. Šírka štrbín sa spravidla pohybuje v rozmedzí 0,15 až 0,30 m a ich umiestnenie môže byť riešené viacerými spôsobmi, napríklad ako jedna štrbina na jednej strane prepážky, dve štrbiny v jednej prepážke, alebo striedavé šachovnicové usporiadanie na oboch stranách bazénu. V niektorých prípadoch sa používajú aj iné kombinácie umiestnenia štrbín, resp. tvarovania prepážok podľa miestnych podmienok a migračných potrieb ichtyofauny. Častokrát sa používajú deflektory ako súčasť prepážky, ktoré usmerňujú prúd, vytvárajú oddychové zóny a zlepšujú migračné podmienky (Figure 1). Štrbinové rybovody sa považujú za vysoko univerzálne a funkčné riešenie, ktoré umožňuje obojsmernú migráciu rýb rôznych veľkostí a druhov [2,3,13,14].

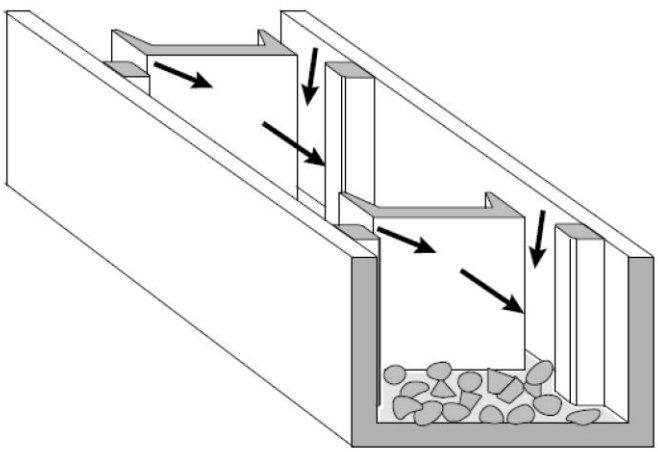


Figure 1: Vertical slot fish pass with two slots and deflectors

2.3 Fyzikálny model

Fyzikálny model technického štrbinového rybovodu bol zhotovený na VÚVH v Bratislave, kde prebehli merania prietoku, hĺbok a rýchlostí. Model bol navrhnutý pre simuláciu podmienok v rôznych rybích pásmach – pstruhovom, lipňovom, mrenovom a pleskáčovom. V rámci experimentov sa simulovali rôzne prietoky a merali zodpovedajúce hĺbky a rýchlosť vody (Figure 4), aby bolo možné overiť hydraulické podmienky a funkčnosť rybovodu pre viaceré ekologicky významné scenáre.

Tu popísaná geometria je pre pstruhové pásmo. Celková dĺžka modelu bola približne 6,70 m, pričom dno aj prepážky boli vyhotovené z betónu. Dno rybovodu je rovné a pozdĺž jeho dĺžky sa nachádza päť štrbín so šírkou 0,20 m. Vzdialenosť medzi štrbinami je 0,70 m (Figure 2). Na vtoku aj výtoku z bazénov sa nachádzajú bazény na ustálenie vody v rybovode. Prevýšenie dna susedných bazénov je 0,13 m, pričom výškové úrovne jednotlivých bazénov sú nasledovné (Figure 3) [15]:

1. bazén – 0,00 m,
2. bazén – 0,13 m,
3. bazén – 0,26 m,
4. bazén – 0,39 m.

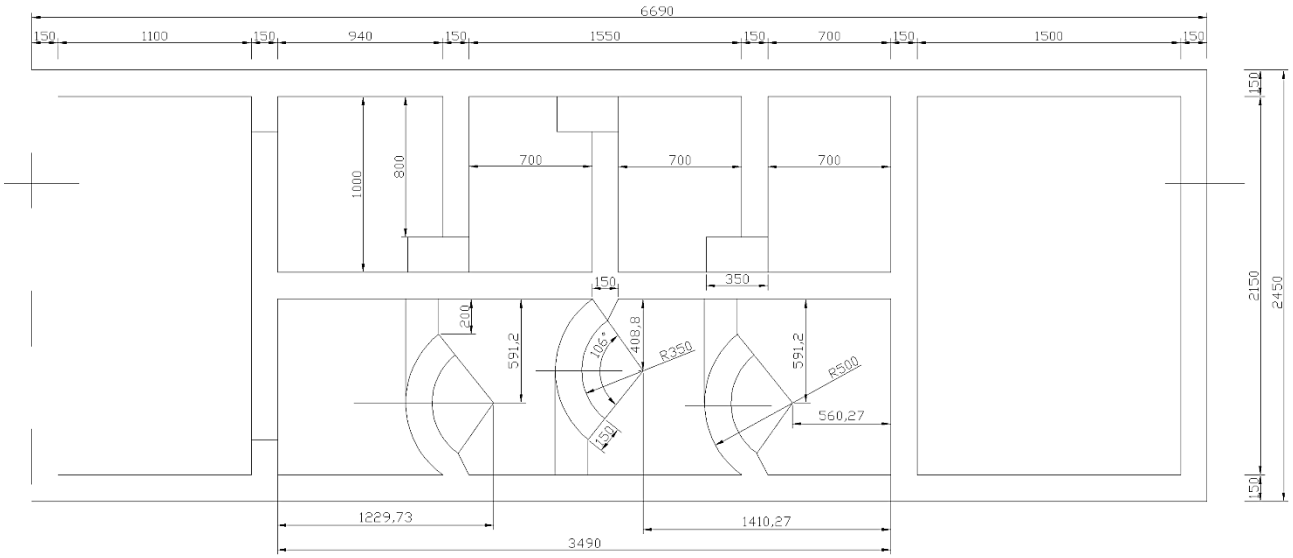


Figure 2: Situation and dimensions of the vertical slots fish pass from the physical model [15]

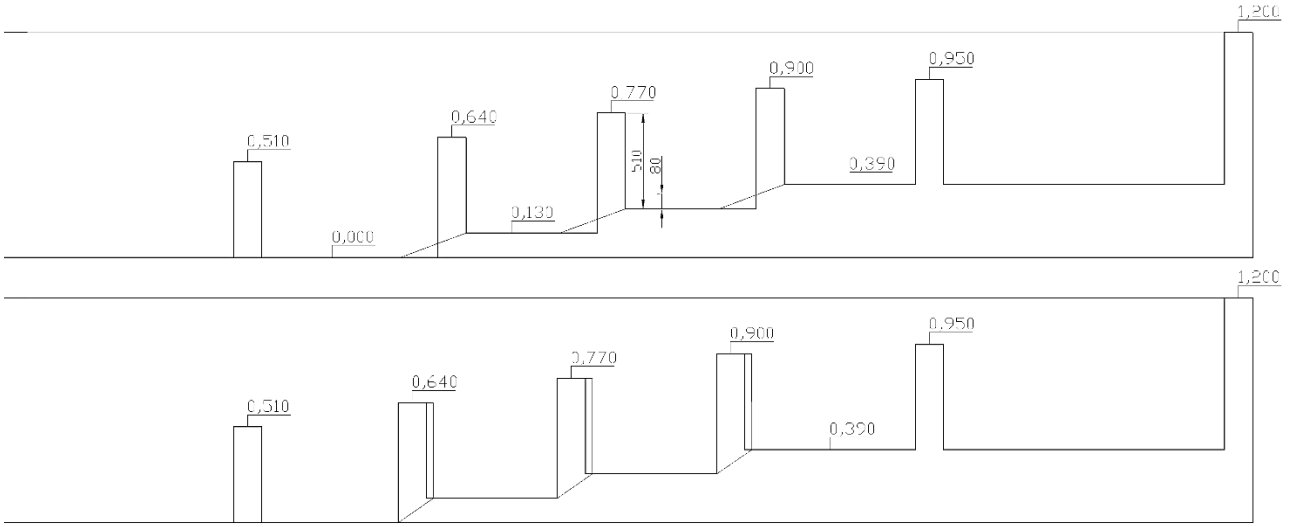


Figure 3: Longitudinal cross-sections of the vertical slots fish pass from the physical model [15] (upper cross-section for rectangular vertical slots, lower cross-section for arced vertical slots)

Medzi štrbinami sa nachádza rampa dĺžky 0,35 m, ktorá spája výškový rozdiel medzi susednými bazénmi. Fyzikálny model bol vyhotovený v dvoch tvarových variantoch – s pravouhlými a oblúkovými prepážkami. Pravouhlá prepážka má rovné hrany a zaisťuje rovnomernejší priebeh prúdenia cez štrbinu, zatiaľ čo oblúková prepážka vytvára mierne rozptýlenie prúdu a nižšie miestne rýchlosti v spodnej časti bazéna, čo môže zlepšiť migráciu menších druhov rýb [15].

V článku je popísaný postup pre variant s rovným dnom. Po odladení modelu a kalibrácii bude rovnakým spôsobom riešená aj geometria s oblúkovou prepážkou, resp. variantné riešenia geometrie rybovodu so šikmým dnom (Figure 4). Takýto fyzikálny model reprezentuje typický technický štrbinový rybovod používaný na slovenských tokoch a umožňuje overenie hydraulických pomerov a kalibráciu matematického modelu [2,3,15].

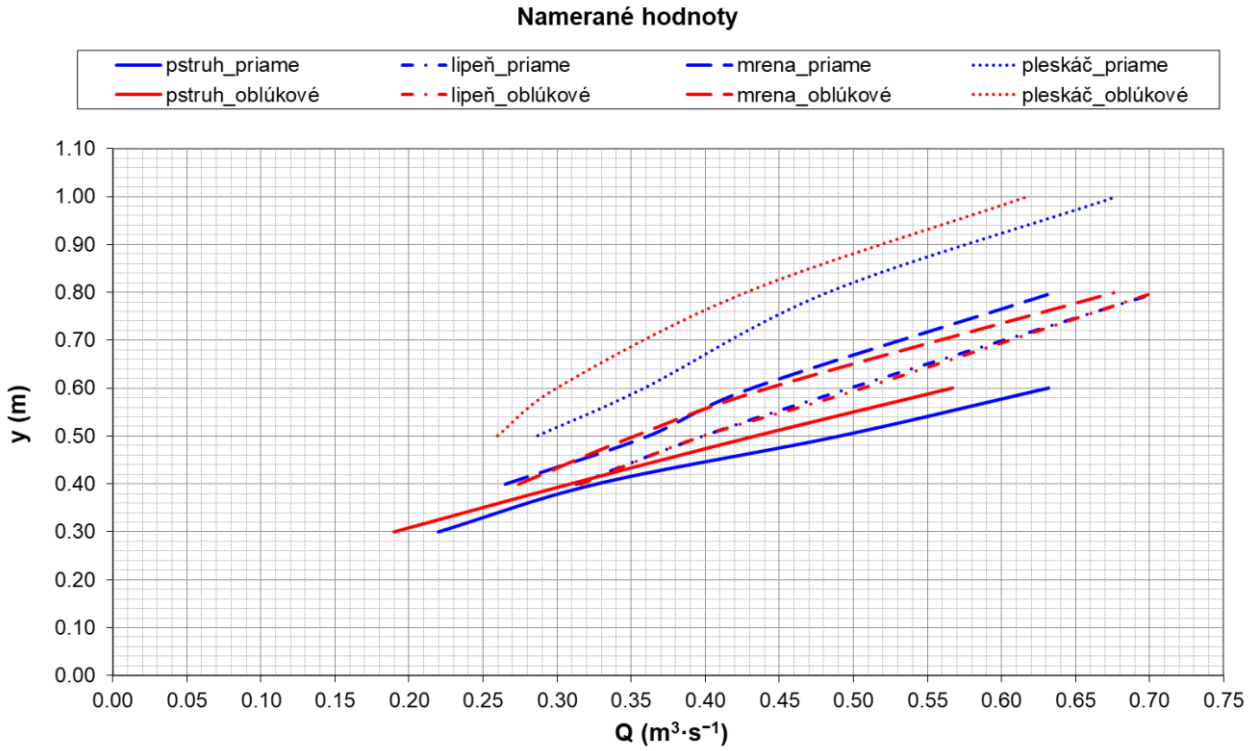


Figure 4: Measured data – relationship between water depth and supplied discharge [12]

2.4 Matematický model

Matematický model bol vytvorený v programe HEC-RAS 6.5. Geometria modelu bola odvodená z pôdorysu fyzikálneho modelu poskytnutého VÚVH a spracovaná v prostredí Autodesk Civil 3D 2024. Z pôdorysu bol vytvorený raster s rozlíšením 1 mm, ktorý bol importovaný do HEC-RAS ako GeoTIFF terénny model [15].

Výpočtová sieť bola definovaná ako „*2D Flow Area*“. Základná veľkosť výpočtovej bunky bola 0,10 m, pričom pozdĺž hlavnej prúdnice bola vložená „*Breaklines*“ so zmenšenou veľkosťou buniek na 0,05 m s cieľom presnejšie vystihnúť zrýchlenie prúdenia v oblasti štrbín (Figure 5).

Okrajové podmienky boli zadané nasledovne:

- **Vtok:** hydrogram prietoku s konštantnou hodnotou Q = 1 $m^3 \cdot s^{-1}$,
- **Odtok:** hydrogram hladiny s konštantnou úrovňou y = 1 m.

Povrchová drsnosť bola definovaná pomocou Manningovho súčiniteľa drsnosti n = 0,015, ktorý zodpovedá hladkému betónu [16]. Časový krok výpočtu bol zadaný na 0,10 s na základe Courantovho čísla, aby bola zabezpečená stabilita simulácie.

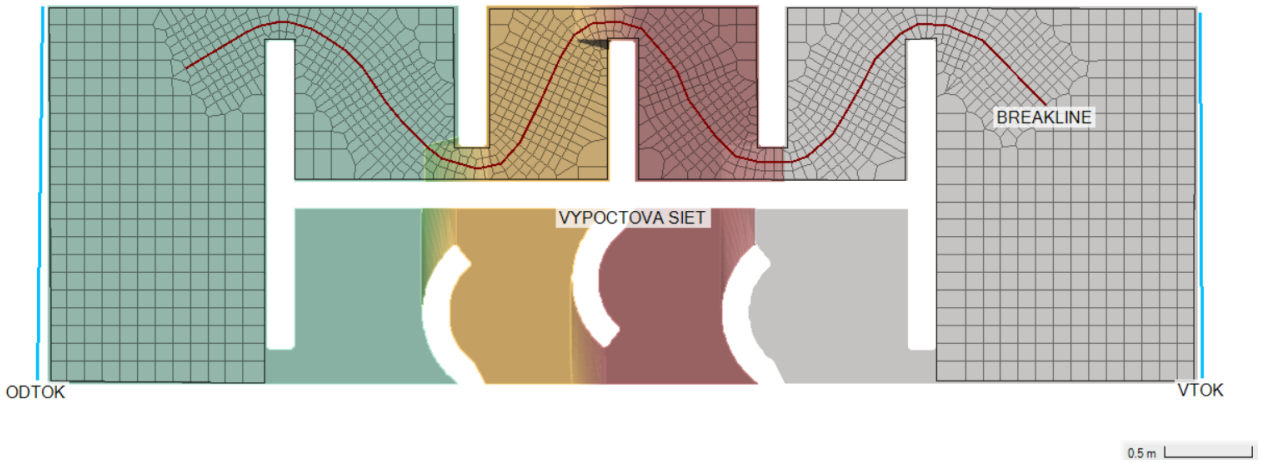


Figure 5: Geometry of the vertical slot fish pass – terrain, computational mesh and boundary conditions

3. Výsledky simulácie

Táto simulácia bola realizovaná ako test stability a funkčnosti modelu, s cieľom overiť, že riešenie problematiky pomocou rovníc plytkej vody (SWE-ELM) v programe HEC-RAS správne počíta prúdenie vody pre geometriu so štrbinami a poskytuje stabilné hydraulické výsledky bez numerických oscilácií. Výpočty prebehli bez chýb a model vykazoval stabilitu počas celého časového priebehu simulácie. Model bol stabilný po čase simulácie 3 hodiny.

Výsledky potvrdili, že model dokáže správne zachytiť hydraulické pomery v oblasti štrbín, vrátane lokálnych zrýchlení a rozdelenia rýchlostí v bazénoch, ale dosiahli sa nereálne výsledky. Maximálna dosiahnutá hĺbka vody v oblasti pravouhlej štrbiny bola 3,10 m a maximálna rýchlosť prúdenia dosiahla 5,10 $m \cdot s^{-1}$ (Figure 6, Figure 7), pričom podľa predbežného výpočtu pre rýchlosť v štrbine [13], pre očakávaný rozdiel hladín susedných bazénov $\Delta h = 0{,}13$ m, platí:

$$v = (2g\Delta h)^{0,5} = (2 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}13)^{0,5} = 1{,}60\ m \cdot s^{-1} \quad (1)$$

kde: g – gravitačné zrýchlenie,
Δh – prevýšenie susedných bazénov.

Tieto markantné rozdiely je zrejme možné pripísať nulovému pozdĺžnemu sklonu dna rybovodu, čo je ale potrebné preveriť ďalšími simuláciami.

Figure 6: Water depth field for the simulation of the fish pass

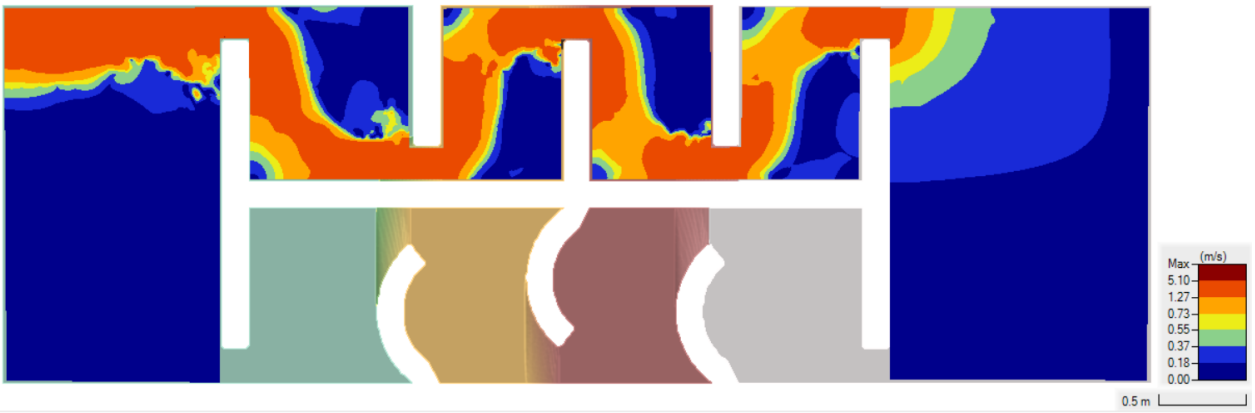


Figure 7: Velocity field for the simulation of the fish pass

Grafické znázornenie (Figure 7) ukazuje, že najvyššie rýchlosti sa koncentrujú v oblasti štrbiny, zatiaľ čo v bazénoch dochádza k rozptýleniu prúdu a zníženiu rýchlosti, čo je dôležité pre migračnú funkciu rybovodu. Hĺbky sú rozložené rovnomerne, pričom lokálne zmeny súvisia s tvarom prepážok.

4. Záver a diskusia

Model SWE-ELM s modelovaním turbulencie v programe HEC-RAS funguje správne a poskytuje stabilné riešenia pre prírode blízke riešenia rybích priechodov [10-12]. Aplikácia na technické rybovody s nulovým pozdĺžnym sklonom dna vyžaduje ďalšie podrobnejšie skúmanie alebo výber iného simulačného prostriedku, ako je napr. River2D alebo dokonca trojdimenzionálneho numerického modelu.

Po vyriešení problému s dosahovaním nereálnych výsledkov zo simulačného modelu, bude ďalším krokom kalibrácia modelu podľa fyzikálnych meraní pre všetky štyri namerané prietoky a hĺbky vody a taktiež všetky 4 rybie pásma – pstruhové, lipňové, mrenové, pleskáčové. Počas kalibrácie sa bude upravovať Manningov súčiniteľ drsnosti tak, aby simulované hĺbky a rýchlosti zodpovedali nameraným údajom. Po kalibrácii budú nasledovať simulácie ďalších geometrických variantov, ako je geometria so šikmým dnom alebo s rozrážačmi, s cieľom vyhodnotiť ich hydraulickú účinnosť a ekologickú vhodnosť.

Výsledky na prírode blízkych rybovodoch ukázali, že rovnica SWE-ELM v programe HEC-RAS, pri minimálnej hodnote Courantovho kritéria, je schopná stabilne počítať prúdenie v rybovode bez numerických oscilácií. Aj keď je to pre tento matematický model, ktorý sa zväčša používa na veľké inundačné územia, limitný prípad použitia. Odladenie modelu aj pre štrbinové typy rybovodov bude kľúčové pre jeho ďalšie využitie pri detailnej analýzy hydraulických pomerov v nich. Taktiež úprava Manningovho súčiniteľa drsnosti bude rozhodujúca pre zosúladenie simulovaných parametrov s fyzikálnymi meraniami. Dôležité je tiež poukázať na význam geometrických detailov, ako je tvar prepážok – pravouhlé a oblúkové, ktoré ovplyvňujú lokálne rýchlosti a energetický spád, čo bude predmetom ďalšej fázy výskumu. Okrem hydraulických aspektov bude potrebné zohľadniť aj ekologické kritériá, ako je migračná priechodnosť pre rôzne druhy rýb. To si bude vyžadovať posúdenie a zosúladenie výsledkov z matematického modelovania s biologickými požiadavkami.

Poďakovanie:

Tento výskum bol podporovaný z grantu v rámci Programu na podporu mladých výskumníkov s názvom: Analýza riadiacich rovníc 2D modelu pre účely detailného hydrodynamického modelovania a projektami výskumnej agentúry APVV-20-0023 a APVV-23-0447.

Literatúra:

[1] BRANCO, P. a kol.: Vertical Slot Fishways: Incremental Knowledge to Define the Best Solution. *Biology*, 2023, roč. 12, 1431.

[2] Merkblatt Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) 232/1996 Fischaufstiegsanlagen: Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle.

[3] Merkblatt DWA-M 509 (2014). Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung.

[4] KATOPODIS, Ch.: *Introduction to Fishway Design*: technical report. Winnipeg, Canada: Freshwater Institute, 1992, 72 s.

[5] RAJARATNAM, N. a kol.: Hydraulics of Vertical Slot Fishways. In: Journal of Hydraulic Engineering. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1986, roč. 112, č. 10, s. 909-927.

[6] BOMBAČ, M. a kol.: Mathematical modeling of flow in vertical slot fishways. *Acta hydrotechnica,* 2020, roč. 33, č. 59, 97-112 s.

[7] GILJA, G. a kol.: Experimental Investigation of the Reynolds Shear Stress Exceedance Rate for the Injury and Disorientation Biocriteria Boundary in the Pool-Orifice and Vertical Slot Type Fishways. *Applied Sciences,* roč. 11, 7708.

[8] IANCULESCU, D. a kol.: Numerical Analysis and Hydraulic Considerations of Technical Fishways Designed for Trout Species in Mountainous Areas. *Preprints*, 2025, 5 s.

[9] HEC-RAS Documentation, [online]. [cit. 25.10.2025].
Dostupné na: https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs

[10] VIDOVÁ, A.: Simulácia prúdenia v prírode blízkom rybovode. In: *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering.* Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2024, 499-506 s. ISBN 978-80-227-5461-3. [cit. 26.10.2025] Dostupné na: https://www.svf.stuba.sk/buxus/docs/aacee/Zbornik_AACEE_2024.pdf

[11] VIDOVÁ, A. - ČUBANOVÁ, L.: Analysis of the 2D hydraulic equations for fish pass modelling. In: *18th International Symposium on Water Management and* Hydraulic Engineering WMHE 2024, Bratislava : Spektrum STU, 2024, 94-103 s. ISBN 978-80-227-5433-0. [cit. 26.10.2025] Dostupné na:
wmhe2024.hydrotechnika.sk/dokumenty/wmhe/wmhe_2024_symposium_proceedings_final.pdf

[12] VIDOVÁ, A. - ČUBANOVÁ, L.: Assessment of fish pass design parameters to meet required hydraulic criteria. In: *Young Scientist 2025 (YS25): the 17th International Scientific Conference of*

Civil and Environmental Engineering for the PhD. Students and Young Scientists. Les Ulis : EDP Sciences, 2025, 10 s.

[13] POLÁK, V. a kol.: *Metodika spriechodňovania priečnych bariér na vodných tokoch pre ichtyofaunu. Revízia metodického usmernenia „Určenie vhodných typov rybovodov podľa typológie vodných tokov" a jeho doplnenie o najnovšie poznatky (rok vydania 2015).* Bratislava: Výskumný ústav vodného hospodárstva. [online]. Dostupné na: https://www.vuvh.sk/wp-content/uploads/2023/12/Metodika-spriechodnovania-priecnych-barier_2023.pdf [cit. 25.10.2025].

[14] ČUBANOVÁ, L.: *Možnosti overenia hydraulického návrhu rybích priechodov*: habilitačná práca. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave. Stavebná fakulta, 2024. 172 s.

[15] REBENDA, F - ČUBANOVÁ, L.: *Modelový výskum balvanitých meandrových rybovodov ako súčasť malých vodných elektrární:* Matematické modelovanie vybraných typov rybovodov. Bratislava: Výskumný ústav vodného hospodárstva, 2008.

[16] CHOW, V. T.: *Open-Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill. 1959; ISBN 07-010776-9

Miriam Zaťovičová[1]
Študijný program: Krajinárstvo, IV. Ročník

METODIKA NÁVRHU ADAPRAČNÝCH STRATÉGIÍ NA ÚZEMÍ BRATISLAVY POMOCOU ANALÝZY MIKROKLIMATICKÝCH ROZDIELOV ULÍC

METHODOLOGY FOR DESIGNING ADAPTATION STRATEGIES IN BRATISLAVA BASED ON THE ANALYSIS OF MICROCLIMATIC DIFFERENCES OF STREETS

Abstract

Urban overheating is one of the most pressing impacts of climate change, reducing outdoor comfort and increasing health risks. This study analyses surface temperature patterns in the historic centre of Bratislava through thermographic measurements conducted in 2023 and 2024, focusing on the relationship between street geometry, orientation, and functional use.
The results confirmed distinct thermal behaviours between street types. Narrow street canyons exhibited a stable, one-sided overheating pattern, with temperature differences exceeding 30 °C between sunlit and shaded sides. In contrast, wide streets showed a dynamic daily cycle, with morning maxima on south-eastern and southern sides (35–42 °C) and afternoon peaks on south-western and western sides exceeding 50 °C. The highest recorded surface temperature reached 70.8 °C on a dark southern façade.
The study proposes a method for linking these thermal patterns with functional urban design. It defines orientation-based adaptation strategies – permanent greenery and reflective materials for persistently hot southern and south-eastern sides, and time-sensitive shading or water elements for afternoon-exposed areas. The approach demonstrates how targeted microclimatic analysis can directly inform adaptive street design and improve thermal resilience at a human scale.

Kľúčové slová
Zelená infraštruktúra, klimatická zmena, mestské tepelné ostrovy, prehrievanie miest

1. Úvod

Klimatická zmena predstavuje jednu z najväčších výziev pre udržateľný rozvoj miest. Jedným z jej najvýraznejších prejavov v urbanizovanom prostredí je fenomén mestských tepelných ostrovov (Urban Heat Island – UHI). Tento jav spôsobuje, že teploty v mestách sú dlhodobo vyššie ako v ich okolí. Vzhľadom na komplexnosť klimatickej krízy neexistuje univerzálny adaptačný plán, preto je potrebné rozvíjať lokálne prispôsobené a interdisciplinárne stratégie [1,2].

Doterajší výskum sa často sústreďuje buď na technologické, alebo na spoločensko-politické aspekty. Avšak mestské prostredie je zložitý systém a oddelenie prístupov vedie k neúčinným riešeniam. Efektívna adaptácia si vyžaduje kombináciu viacerých uhlov pohľadu [3]. Pri navrhovaní opatrení sa

[1] Miriam Zaťovičová, Ing.
Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra vodného hospodárstva krajiny, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

preto odporúča posudzovať, kde majú tepelné ostrovy najväčší vplyv, kde sa sústreďuje najzraniteľnejšia populácia a kde je deficit modro-zelenej infraštruktúry [4].

1.1 Teplotné ukazovatele a význam mikroklímy

Tradične sa pre hodnotenie prehrievania miest používa teplota vzduchu. Tá je však relatívne homogénna a nereflektuje detailné mikroklimatické pomery v uliciach. Výhodnejším indikátorom je povrchová teplota, ktorá presnejšie vystihuje prehrievané miesta a umožňuje priestorovo explicitnú charakteristiku lokálneho teplotného stresu [5]. Povrchy akumulujú teplo a následne ho odovzdávajú okolitému prostrediu, čo má priamy dopad na tepelný komfort obyvateľov.

Okrem toho biometeorologické indexy, ako UTCI alebo PET, lepšie vystihujú reálne podmienky, keďže zohľadňujú aj ďalšie faktory – rýchlosť vetra, sálavé teplo či fyziologickú odozvu človeka [6,7]. Sálavé teplo má vplyv na tepelnú pohodu dokonca výraznejší než samotná teplota vzduchu [8]. Tieto metriky sú však výpočtovo a dátovo náročné, čo obmedzuje ich využitie v mestskom plánovaní. Povrchová teplota preto predstavuje kompromis medzi dostupnosťou dát a relevantnosťou výsledkov.

1.2 Teplotný stres a jeho riziká

Teplotný stres patrí medzi kľúčové zdravotné riziká spojené s UHI. Extrémne teploty ohrozujú fyziologické procesy a zvyšujú výskyt dehydratácie, hypertermie, zlyhania orgánov či predčasných úmrtí, najmä u detí, seniorov a chronicky chorých [3, 9]. Napríklad vlna horúčav v Európe v roku 2003 si vyžiadala približne 70 000 obetí [10] . Prognózy naznačujú, že do roku 2050 môže úmrtnosť v dôsledku tepla vzrásť až o 300 % [11]. Okrem fyzického zdravia majú vysoké teploty negatívny dopad aj na psychické zdravie, kognitívnu výkonnosť a produktivitu [12].

2. Metodika

2.1 Výber lokality

Skúmaným územím je mestská časť Staré Mesto v Bratislave, predovšetkým jej historické jadro, charakteristické kompaktnou zástavbou, vysokým podielom spevnených plôch a intenzívnou pešou a dopravnou aktivitou. Podľa Atlasu zraniteľnosti a hodnotenia rizík nepriaznivých dôsledkov zmeny klímy patrí Staré Mesto medzi najohrozenejšie časti Bratislavy. Lokalita je zvolená nielen pre svoju zraniteľnosť, ale aj pre reprezentatívnosť – jej urbanistická štruktúra je typická pre mnohé stredoeurópske mestá s podobnou históriou. Preto sú výsledky tohto výskumu vysoko pravdepodobne použiteľné aj v iných mestách strednej Európy s podobnou urbanistickou štruktúrou.

2.2 Výber reprezentatívnych ulíc

Výskum sa sústredil na identifikáciu ulíc reprezentujúcich dva dominantné typy mestského priestoru. Úzke ulice majú pomer výška/šírka (H/W) ≥ 2, spravidla jednosmernú dopravu a budovy do šiestich poschodí. Široké ulice majú pomer $H/W < 2$, väčšinou viacero jazdných pruhov a zástavbu do ôsmich poschodí. Pre analýzu bolo vybraných osem ulíc s rôznou orientáciou. Medená, Muzejná a Tobrucká reprezentujú úzke ulice, zatiaľ čo Mlynské nivy, Dunajská, Námestie SNP a Štúrova patria medzi

široké. Kritériom výberu bola aj pešia dostupnosť všetkých profilov, keďže merania boli realizované ručne a museli prebehnúť v rovnakých mikroklimatických podmienkach.

2.3 Meracie zariadenie

Merania sa realizovali ručnou termokamerou FLIR E52, profesionálnym zariadením s rozlíšením 240×180 pixelov, tepelnou citlivosťou lepšou ako 50 mK pri 30 °C a meracím rozsahom –20 až 550 °C. Deklarovaná presnosť bola ±2 °C alebo ±2 % nameranej hodnoty. Kamera podporuje radiometrické snímkovanie a pokročilú analýzu. Pred meraniami bola kalibrovaná výrobcom.

Pre zabezpečenie presnosti boli nastavené emisivity podľa materiálov: asfalt 0,95, betónová dlažba 0,92 a omietka 0,90. Sklenené plochy boli merané pomocou emisivitných nálepiek s $\varepsilon = 0{,}95$, ktoré eliminovali odrazy a poskytli presnejšie údaje. Pri fasádach sa meralo vo výške 1,3 m nad terénom, čo zodpovedá úrovni chodcov. Povrchy vozoviek a chodníkov boli snímané priamo.

2.4 Podmienky merania

Merania prebiehali počas letných mesiacov jún až september v rokoch 2023 a 2024. Vyberali sa dni s maximami nad 30 °C, bez oblačnosti a bez zrážok, aby sa eliminoval vplyv meteorologických premenných. Merania sa robili v troch denných časoch: o 9:00, 14:00 a 23:00. Tieto intervaly zodpovedajú nástupu solárneho ohrevu, dennému maximu a nočnému uvoľňovaniu akumulovaného tepla.

V každej ulici sa sledovalo päť typov povrchov: asfalt, dlažba, svetlá a tmavá omietka a sklo. Merania sa vykonali na oboch stranách ulíc, aby sa zachytil efekt orientácie a tienenia. Každý materiál bol meraný na troch miestach a hodnoty boli spriemerované.

2.5 Spracovanie dát

Dáta boli analyzované podľa typológie ulíc, orientácie a materiálov. Hodnotili sa teplotné extrémy, rozdiely medzi stranami ulíc a medziročné zmeny. Cieľom bolo identifikovať lokality predisponované na prehrievanie a vyvodiť odporúčania pre priestorovo a časovo cielené adaptačné opatrenia.

3. Výsledky

3.1 Medziročné porovnanie pre úzke ulice

Merania v roku 2024 boli v priemere o 5°C vyššie než v roku 2023. Denné trendy povrchových teplôt boli vo všetkých časoch dňa podobné ako v predchádzajúcom roku, no objavila sa zmena pri severo-južnom smerovaní osi ulice.

Kým v roku 2023 boli teplotné priebehy v týchto orientáciách vyrovnané a patrili medzi najnižšie, v roku 2024 sa prejavil výraznejší vplyv slnečného žiarenia. Ranné merania ukázali, že povrchové teploty východne orientovaných fasád vystavených slnku sa významne zvýšili a patrili medzi najvyššie hodnoty. Naopak, popoludňajšie merania potvrdili nárast teplôt západne orientovaných

materiálov, najmä asfaltu a dlažby, ktoré sa tak vyrovnali hodnotám východných fasád prehrievajúcich sa v ranných hodinách.

Teploty všetkých typov fasád v orientácii sever–juh však v popoludňajších meraniach zostali medzi najnižšími.

Podobne ako v roku 2023, tak aj v 2024, najteplejšie zostali profily orientované na juh, juhovýchod a juhozápad. Najvyšší rozdiel teplôt materiálov v rámci jednej orientácie sa prejavil na juhozápadnej strane ulice popoludní, kde rozdiel medzi povrchom chodníka (60,4 °C) a svetlou fasádou (43,5 °C) dosiahol takmer 17°C.

Najvýraznejšie extrémy v rámci celého uličného koridoru boli opäť na juhozápadne orientovaných stranách popoludní, kde chodníky dosiahli až 60,4 °C, zatiaľ čo zatienené povrchy na opačnej, severovýchodnej, strane mali iba okolo 30 °C. Rozdiel medzi povrchmi v rámci jednej orientácie tak presiahol 30 °C, čo ilustruje extrémnu nerovnováhu mikroklimatických podmienok v rámci jedného uličného profilu.

3.2 Medziročné porovnanie širokých ulíc

Trend povrchových teplôt v roku 2024 bol pri všetkých povrchoch a orientáciách podobný ako pri meraniach z roku 2023. Zaznamenali sme však výrazný nárast teplôt na južnej strane počas ranných meraní, ktoré predstavovali maximálne hodnoty pre ranné merania. V priemere boli tieto hodnoty o 9,5 °C vyššie v porovnaní s rokom 2023.

Najvyššia nameraná hodnota povrchovej teploty sa objavila na tmavej fasáde orientovanej na juh na Mlynských nivách, kde dosiahla 70,8 °C. Povrchové teploty všetkých materiálov na opačnej severnej strane dosahovali približne 30 °C. V rámci tejto orientácie to znamená rozdiel takmer 40°C medzi osvetlenou a zatienenou stranou jednej ulice. Tieto výsledky jasne ukazujú dôležitosť analýzy lokálnych podmienok a naznačujú, že jedna časť ulice môže profitovať z adaptačných opatrení výrazne viac než druhá.

3.3 Odporúčania pre úzke ulice

Na rozdiel od širokých ulíc vykazujú úzke uličné kaňony konzistentnejší vzorec prehrievania počas celého dňa. Ich tepelný režim je do veľkej miery určovaný orientáciou a obmedzenou šírkou. Úzky uličný kaňon nedovolí schladenie ulíc tak efektívne ako pri širokých uliciach. Ulice s osou východ–západ, najmä tie s južne, juhovýchodne a juhozápadne orientovanými fasádami, sú vystavené priamemu slnečnému žiareniu najdlhšie a opakovane dosahujú najvyššie povrchové teploty. Tieto konzistentné vlastnosti z nich robia prioritné lokality pre cielené adaptačné zásahy bez ohľadu na dennú dobu.

Keďže budovy často tienia iba jednu stranu ulice, zatiaľ čo druhá ostáva dlhodobo osvetlená, opatrenia by mali byť orientované najmä na prehrievanú stranu.

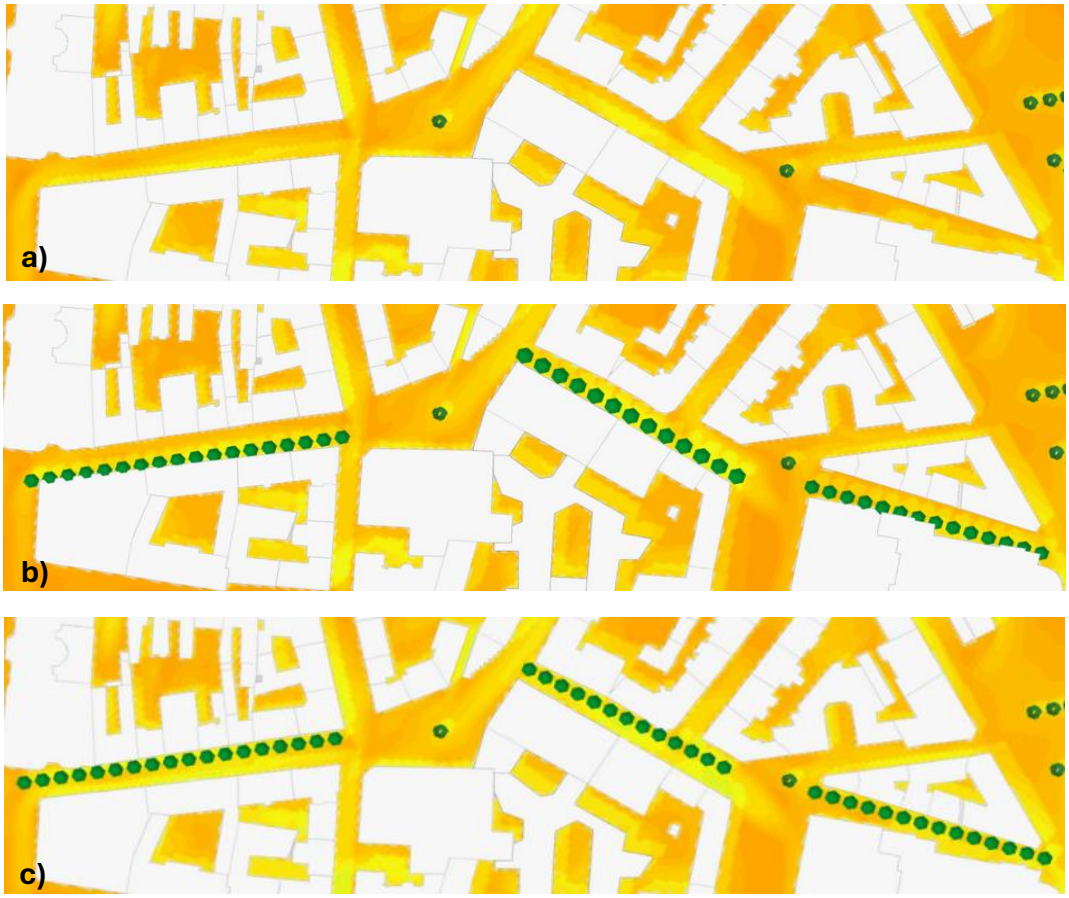
Najvhodnejšie je použitie stromov, ktoré nielen tienia, ale dodatočne ochladzujú atmosféru výparom [5, 13, 14, 15]. V husto zastavaných a historických častiach miest je však často nemožná výsadba

stromov z dôvodu hustej infraštruktúrnej siete a stiesnených priestorových pomerov. Vtedy je vhodné použitie ozelenených tieniacich konštrukcií ako arkády alebo pergoly nad chodníkmi. V týchto prípadoch nemusí ísť o súvislé konštrukcie, ale o vytvorenie akýchsi tienených ochladzovacích oáz, ktoré je vhodné umiestniť cielene na základe prevádzky danej ulice.

Výrazne pomôcť môžu vertikálne zelené prvky, ako sú popínavé rastliny na slnečných fasádach, ktoré zabránia prehrievaniu fasád. Tým eliminujú sálavé teplo na exteriérovej strane, ale tiež pomôžu udržať príjemnejšiu klímu v interiéri. Minimálnym technickým, ale podľa výsledkov meraní účinným nástrojom je použitie svetlejších a reflexnejších povrchov na fasádach.

Rozdiely v povrchových teplotách medzi protiľahlými stranami úzkej ulice môžu presiahnuť 30 °C, čo potvrdzuje, že aplikovať opatrenia plošne na celý uličný profil je málo efektívne. Namiesto toho je potrebné zvoliť vyvážený a kontextovo citlivý prístup, ktorý cieli presne na tie časti ulice, kde adaptácie prinášajú najväčší tepelný prínos. Simulácie z programu Autodesk Forma ukazujú, že správne použitie vegetácie zlepší situáciu nielen na exponovanej strane, ale v celom uličnom profile (Obr.1).

Úzke ulice si vyžadujú jednoduchšie, ale presne zacielené opatrenia, ktoré sa orientujú na prehrievanú stranu a zohľadňujú konkrétne potreby užívateľov priestoru. Kľúčové je, že v úzkych uliciach nie je potrebné rozdeliť adaptačné opatrenia podľa dennej doby, keďže prehrievanie postihuje jednu stranu profilu trvalo. Preto je potrebné navrhovať zásahy tak, aby sa dlhodobo stabilizovala mikroklíma na exponovanej strane a zároveň zvýšil komfort používateľov v priestore počas celého dňa.



Obr. 1 a) *mikroklimatická simulácia teplotného komfortu vybraných úzkych ulíc v súčasnom stave bez vegetácie modelovaná v programe Forma*

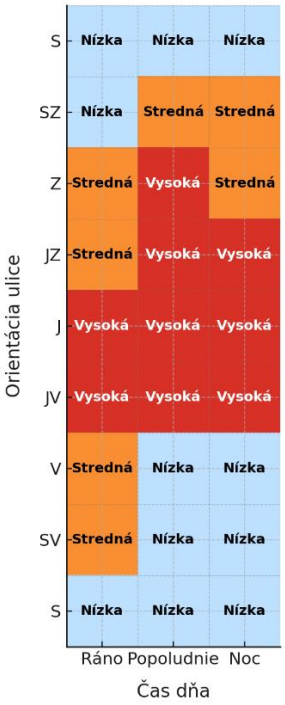
b) *mikroklimatická simulácia teplotného komfortu vybraných úzkych ulíc vo variante nesprávneho umiestnenia vegetácie na neprehrievaných stranách ulice modelovaná v programe Forma*

c) *mikroklimatická simulácia teplotného komfortu vybraných úzkych ulíc vo variante správneho umiestnenia vegetácie na prehrievaných stranách ulice modelovaná v programe Forma*

3.4 Odporúčania pre široké ulice

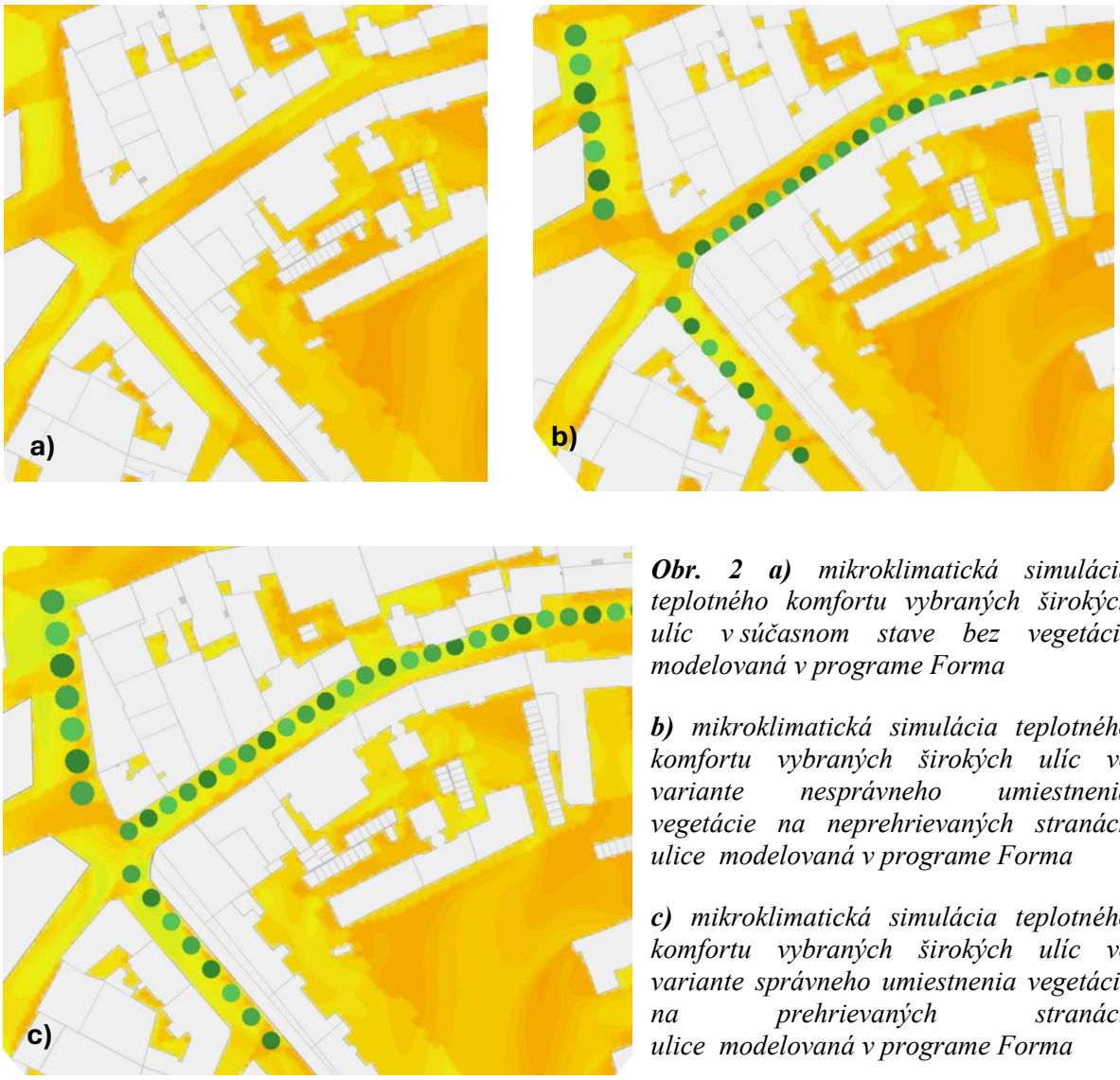
Široké ulice sa od úzkych výrazne líšia tým, že ich otvorená geometria umožňuje dlhšie trvanie priameho slnečného žiarenia, ale zároveň podporuje lepšie prúdenie vzduchu a rýchlejšie ochladzovanie priestoru. Výsledkom je, že teplotné pomery sa počas dňa menia dynamickejšie a nedá sa určiť jedna trvalo najteplejšia orientácia.

V prípade širokých ulíc sa prejavuje výrazná časová variabilita prehrievania. Ráno sa prehrievajú najmä južné, juhovýchodné a severovýchodné orientácie, kde povrchové teploty dosahujú 35–42 °C. Popoludní sú však extrémy výraznejšie – južné, juhozápadné a západné orientácie prekračujú 50 °C, pričom na južnej strane sa povrchová teplota pohybuje na hranici 60 °C. To znamená, že hoci ráno dosahujú lokálne maximá, ich hodnoty sú nižšie a navyše sa počas dňa postupne vyrovnávajú alebo ochladzujú, najmä pri severovýchodnej orientácii. Adaptačné opatrenia tam teda nemusia byť prioritné. Poobedné hodnoty sú kritickejšie a predstavujú najväčšie riziko pre tepelný komfort. Nočné merania ukazujú, že hoci sa teploty po zotmení znižujú a ich rozdiely vyrovnávajú, južné a juhovýchodné orientácie zostávajú mierne teplejšie než ostatné, čo potvrdzuje ich dlhodobú tepelnú záťaž. Severné strany zostávajú počas celého dňa najchladnejšie.



Z praktického hľadiska by sa teda opatrenia na zlepšenie mikroklímy mali sústrediť predovšetkým na južné a juhovýchodné úseky ulíc, ktoré patria medzi najteplejšie počas celého dňa, a preto si vyžadujú trvalé a stabilné riešenia. Ide napríklad o výsadbu stromoradí s prekrývajúcimi sa korunami, ktoré zabezpečia plynulý tieň počas celého dňa, alebo o využitie vertikálnej zelene a zelených stien, ktoré znižujú sálavé teplo z fasád. Vhodné sú aj svetlé a chladivé materiály na povrchoch chodníkov a fasád, ktoré minimalizujú akumuláciu tepla. V prípade obytných a zmiešaných ulíc, kde sa obyvatelia pohybujú počas celého dňa, je dôležité kombinovať trvalé opatrenia s flexibilnými prvkami – napríklad pergolami, markízami alebo popínavými rastlinami, ktoré dokážu regulovať tienenie podľa ročného obdobia a intenzity slnka.

Obr. 2 *Intenzita potreby adaptačných opatrení podľa orientácie širokých ulíc a času dňa*



Obr. 2 a) *mikroklimatická simulácia teplotného komfortu vybraných širokých ulíc v súčasnom stave bez vegetácie modelovaná v programe Forma*

b) *mikroklimatická simulácia teplotného komfortu vybraných širokých ulíc vo variante nesprávneho umiestnenia vegetácie na neprehrievaných stranách ulice modelovaná v programe Forma*

c) *mikroklimatická simulácia teplotného komfortu vybraných širokých ulíc vo variante správneho umiestnenia vegetácie na prehrievaných stranách ulice modelovaná v programe Forma*

3.4.1 Odporúčania z hľadiska funkčného využitia ulíc

Hlavné dopravné a komunikačné trasy

Široké ulice, ktoré dosahujú denné maximá v popoludňajších hodinách sú orientované na juh, juhozápad a západ. Dopravné a komunikačné trasy sa teda najviac prehrievajú popoludní, kedy je v mestskom prostredí najvyššia dopravná aj pešia aktivita – obyvatelia sa vracajú z práce, presúvajú sa medzi službami či trávia voľný čas v exteriéri. Práve v tomto čase je na týchto uliciach nevyhnutné zabezpečiť dostatočné tienenie, ktoré zníži tepelný stres a zvýši komfort pohybu. Efektívnym riešením je výsadba stromoradí s prekrývajúcimi sa korunami, ktoré vytvárajú plynulý tieň pozdĺž celej trasy a znižujú teplotu povrchov chodníkov. Doplniť ich možno o tieniace prístrešky, pergoly alebo markízy, ktoré poskytujú tieň na miestach, kde sa ľudia zdržiavajú dlhšie – pri zastávkach, priechodoch pre chodcov alebo v čakacích zónach. Významným prvkom sú aj zelené pásy medzi cestnou komunikáciou a chodníkom, ktoré fyzicky aj tepelne oddeľujú pešiu zónu od dopravnej plochy, čím znižujú vplyv sálavého tepla z asfaltu a zlepšujú vnímaný komfort prostredia.

Obytné zóny

V obytných uliciach a v zónach s prevádzkami, najmä pri južných a juhovýchodných orientáciách, je kľúčové vytvoriť stabilné a príjemné mikroklimatické prostredie počas celého dňa. Ide o lokality, kde sa ľudia pohybujú nielen popoludní, ale aj dopoludnia – v okolí škôl, úradov, kaviarní či služieb. Vhodné je preto kombinovať trvalé a dočasné formy tienenia, ktoré umožnia reagovať na sezónne zmeny. Popínavé rastliny, pergoly alebo sťahovateľné markízy dokážu flexibilne regulovať tieň podľa polohy slnka a intenzity žiarenia. Dôležitú úlohu zohrávajú aj svetlé a chladivé materiály na povrchoch dlažby a fasád, ktoré znižujú akumuláciu tepla a obmedzujú prehrievanie. Zeleň s evapotranspiračným efektom, ako sú nízke stromy, kvetinové výsadby či trvalkové pásy v blízkosti pobytových zón, prispieva k ochladzovaniu prostredia bez narušenia priechodnosti alebo viditeľnosti priestoru.

Každodenná mobilita

Trasy každodennej mobility, ako sú cesty k školám, pracoviskám či službám orientované prevažne na severovýchod alebo juhovýchod patria ráno medzi teplejšie časti mesta, no teploty tu ešte nedosahujú kritické hodnoty. Preto nie je nutné uplatňovať masívne tieniace konštrukcie, ale skôr jemnejšie a estetické zásahy, ktoré podporia komfort ranného pohybu. Vhodné je doplniť lavičky, malé prestrešenia alebo vegetačné tieniace prvky pred vstupmi do škôl a úradov, kde sa ľudia krátkodobo zdržiavajú. Dôležité je pritom zachovať priechodnosť a vetranie ulíc, teda vyhnúť sa príliš hustým výsadbám, ktoré by mohli obmedziť cirkuláciu vzduchu. V prípade severovýchodných orientácií sú najvhodnejšie iba bodové prvky pri kritických bodoch záujmu, keďže kompatibilná juhozápadná strana ulice patrí medzi najprehrievanejšie a preto si vyžaduje výraznejšie zásahy. Pri využití ulíc na každodennú mobilitu je teda peším poskytnutá komfortná alternatíva na rovnakej trase.

Nočný život

Po západe slnka sa teploty vo väčšine ulíc síce vyrovnávajú, no akumulované teplo z asfaltu, fasád a spevnených plôch sa postupne uvoľňuje a prispieva k pretrvávaniu efektu mestského tepelného ostrova. Preto je vhodné doplniť aj prvky, ktoré zlepšujú mikroklímu počas večerných a nočných hodín, najmä v priestoroch s vysokou koncentráciou ľudí, ako sú námestia, reštauračné terasy alebo festivalové areály. Významnú úlohu tu zohrávajú vodné prvky – fontány, vodné hmly, ktoré dokážu znížiť teplotu o niekoľko stupňov a zlepšiť tepelný komfort. Zeleň je pritom účinná nielen cez deň, keď poskytuje tieň, ale aj v noci, keď prostredníctvom evapotranspirácie urýchľuje ochladzovanie povrchov a stabilizuje mikroklimatické podmienky.

Tab. 1 *Typy opatrení na základe orientácie širokých ulíc a spôsobu využitia v časoch dňa*

Orientácia	Intenzita využívania	Dopravné a komunikačné trasy	Obytné a zmiešané zóny	Rekreačné a verejné priestory (večer)
Južná (J)	**Ráno**	Zeleň medzi cestou a chodníkom na redukciu sálavého tepla; stromoradia ako začiatok celodenného tienenia.	Použitie trvalých riešení, najmä stromy, pergoly, popínavé rastliny, svetlé povrchy fasád.	—
	Popoludnie	Súvislé stromoradia s prekrývajúcimi sa korunami, tieniace prístrešky pri zastávkach a priechodoch.	Použitie trvalých riešení, najmä stromy, pergoly, popínavé rastliny, svetlé povrchy fasád.	Tieň prostredníctvom stromov a vegetácie v okolí terás a námestí.
	Noc	—	Zeleň s nočným evapotranspiračným efektom, ktorá pomáha ochladzovaniu fasád.	Fontány, vodné hmly, vegetácia na uvoľnenie akumulovaného tepla.
Juhovýchodná (JV)	**Ráno**	Nízke stromy a zelené pásy na zníženie ranného prehrievania; začiatok evapotranspirácie.	Popínavé rastliny, svetlé povrchy, trvalkové výsadby.	—
	Popoludnie	Stromoradia s prekrývajúcimi sa korunami, kombinácia zelenej infraštruktúry a tieniacich prvkov.	Flexibilné tienenie (markízy, pergoly), chladivé povrchy a zeleň v okolí pobytových zón.	Tieň a vodné prvky v zónach spoločenských aktivít.
	Noc	—	Vegetácia s ochladzovacím efektom znižujúca sálanie povrchov.	Vodné hmly, zeleň s nočným efektom ochladzovania.
Juhozápadná (JZ)	**Ráno**	—	—	—
	Popoludnie	Stromoradia pozdĺž komunikácií, zelené pásy medzi jazdným pruhom a chodníkom.	Kombinácia trvalých a sezónnych tieniacich prvkov; svetlé a chladivé materiály.	Vegetácia v okolí pobytových zón a terás, vodné prvky na zníženie teploty.
Orientácia	**Intenzita využívania**	**Dopravné a komunikačné trasy**	**Obytné a zmiešané zóny**	**Rekreačné a verejné**

				priestory (večer)
	Noc	—	Vegetácia podporujúca rýchlejšie ochladzovanie.	Vodné hmly, vegetácia s nočným efektom.
Západná (Z)	**Ráno**	—	—	—
	Popoludnie	Stromoradia, tieniace konštrukcie a prístrešky na najexponovanejších úsekoch.	Pergoly, popínavé rastliny, zelené steny, svetlé povrchy dlažby.	Zeleň a vegetačné pásy v okolí pobytových miest.
	Noc	—	—	Vodné prvky a vegetácia s evapotranspiračným efektom.
Severovýchodná (SV)	**Ráno**	Ráno teplejšia, vhodné nízke stromoradia alebo pergoly.	Prístrešky a lavičky v tieni.	—
	Popoludnie	Ochladzuje sa – nevyžaduje zásadné opatrenia.	Zachovať priechodnosť a vetranie, vyhnúť sa hustej výsadbe.	—
	Noc	—	—	—
Severná (S)	**Ráno / Popoludnie / Noc**	Minimálne prehrievanie; zachovať otvorenosť a vetranie.	Vhodné umiestnenie mobiliáru a pobytových funkcií.	—

4. Záver

Cieľom tejto práce bolo overiť, ako morfológia a orientácia ulíc ovplyvňujú povrchové teploty a identifikovať typické vzorce prehrievania v mestskom prostredí. Merania ukázali, že povrchová teplota je spoľahlivým a prakticky využiteľným ukazovateľom tepelného stresu. V úzkych uliciach sa potvrdil trvalý a jednostranný vzorec prehrievania, zatiaľ čo v širokých uliciach sa tepelné pomery menia v priebehu dňa – ráno dominujú juhovýchodné a južné strany, popoludní juhozápadné a západné.

Výsledkom je metodika, ktorá umožňuje určovať adaptačné opatrenia podľa typu a orientácie ulice, nie plošne. Práca prináša prepojenie fyzikálnych zistení s funkčným využitím ulíc – ukazuje, kde a kedy sú trvalé opatrenia (napr. stromoradia, vertikálna zeleň) najefektívnejšie a kde postačia flexibilné či sezónne riešenia (tieniace konštrukcie, vodné prvky).

Zistenia potvrdzujú, že pre navrhovanie odolného mesta je rozhodujúce poznať mikroklimatické správanie ulíc v čase aj priestore. Kombinácia cielenej analýzy povrchových teplôt a funkčného plánovania umožňuje efektívne smerovať investície do miest, kde prinesú najväčší tepelný aj spoločenský prínos.

5. Poďakovanie

Tento výskum je realizovaný s pomocou grantu Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej Republiky (VEGA No. 1/0067/23) a Programu na motiváciu a podporu zvyšovania kvality a efektívnosti vedecko-výskumnej činnosti mladých vedecko-výskumných pracovníkov.

6. Zdroje

[1] HE, B.J., J. ZHU, D.X. ZHAO, Z.H. GOU, J. Da QI a J. WANG 2019. Co-benefits approach: Opportunities for implementing sponge city and urban heat island mitigation. *Land Use Policy* [online]. roč. 86, č. May, s. 147–157. ISSN 02648377. Dostupné na: doi:10.1016/j.landusepol.2019.05.003

[2] WANG, C., Z.H. WANG, K.E. KALOUSH a J. SHACAT 2021. Perceptions of urban heat island mitigation and implementation strategies: survey and gap analysis. *Sustainable Cities and Society* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 66, č. October 2020, s. 102687. ISSN 22106707. Dostupné na: doi:10.1016/j.scs.2020.102687

[3] DEGIRMENCI, K., K.C. DESOUZA, W. FIEUW, R.T. WATSON a T. YIGITCANLAR 2021. Understanding policy and technology responses in mitigating urban heat islands: A literature review and directions for future research. *Sustainable Cities and Society* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 70, č. March, s. 102873. ISSN 22106707. Dostupné na: doi:10.1016/j.scs.2021.102873

[4] DAVIS, M. a S. NAUMANN 2017. *Making the Case for Sustainable Urban Drainage Systems as a Nature-Based Solution to Urban Flooding* [online]. ISBN 9783319537504. Dostupné na: doi:10.1007/978-3-319-56091-5_8

[5] MARANDO, F., M.P. HERIS, G. ZULIAN, A. UDÍAS, L. MENTASCHI, N. CHRYSOULAKIS, D. PARASTATIDIS a J. MAES 2022. Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society* [online]. B.m.: Elsevier, 1.2., roč. 77, s. 103564. ISSN 22106707. Dostupné na: doi:10.1016/j.scs.2021.103564

[6] LEE, H., H. MAYER a L. CHEN 2016. Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany. *Landscape and Urban Planning* [online]. B.m.: Elsevier, 1.4., roč. 148, s. 37–50. ISSN 01692046. Dostupné na: doi:10.1016/j.landurbplan.2015.12.004

[7] JANG, S., J. BAE a Y.J. KIM 2024. Street-level urban heat island mitigation: Assessing the cooling effect of green infrastructure using urban IoT sensor big data. *Sustainable Cities and Society* [online]. B.m.: Elsevier, 1.1., roč. 100, s. 105007 [cit. 10. január 2024]. ISSN 2210-6707. Dostupné na: doi:10.1016/J.SCS.2023.105007

[8] CHATZIDIMITRIOU, A. a S. YANNAS 2016. Microclimate design for open spaces: Ranking urban design effects on pedestrian thermal comfort in summer. *Sustainable Cities and Society*

[online]. B.m.: Elsevier, 1.10., roč. 26, s. 27–47. ISSN 22106707. Dostupné na: doi:10.1016/j.scs.2016.05.004

[9] CONNORS, J.P., C.S. GALLETTI a W.T.L. CHOW 2013. Landscape configuration and urban heat island effects: Assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona. *Landscape Ecology* [online]. B.m.: Kluwer Academic Publishers, 1.2., roč. 28, č. 2, s. 271–283. ISSN 15729761. Dostupné na: doi:10.1007/s10980-012-9833-1

[10] WONG, N.H., C.L. TAN, D.D. KOLOKOTSA a H. TAKEBAYASHI 2021. Greenery as a mitigation and adaptation strategy to urban heat. *Nature Reviews Earth & Environment* [online]. B.m.: Springer US, roč. 2, č. 3, s. 166–181. ISSN 2662-138X. Dostupné na: doi:10.1038/s43017-020-00129-5

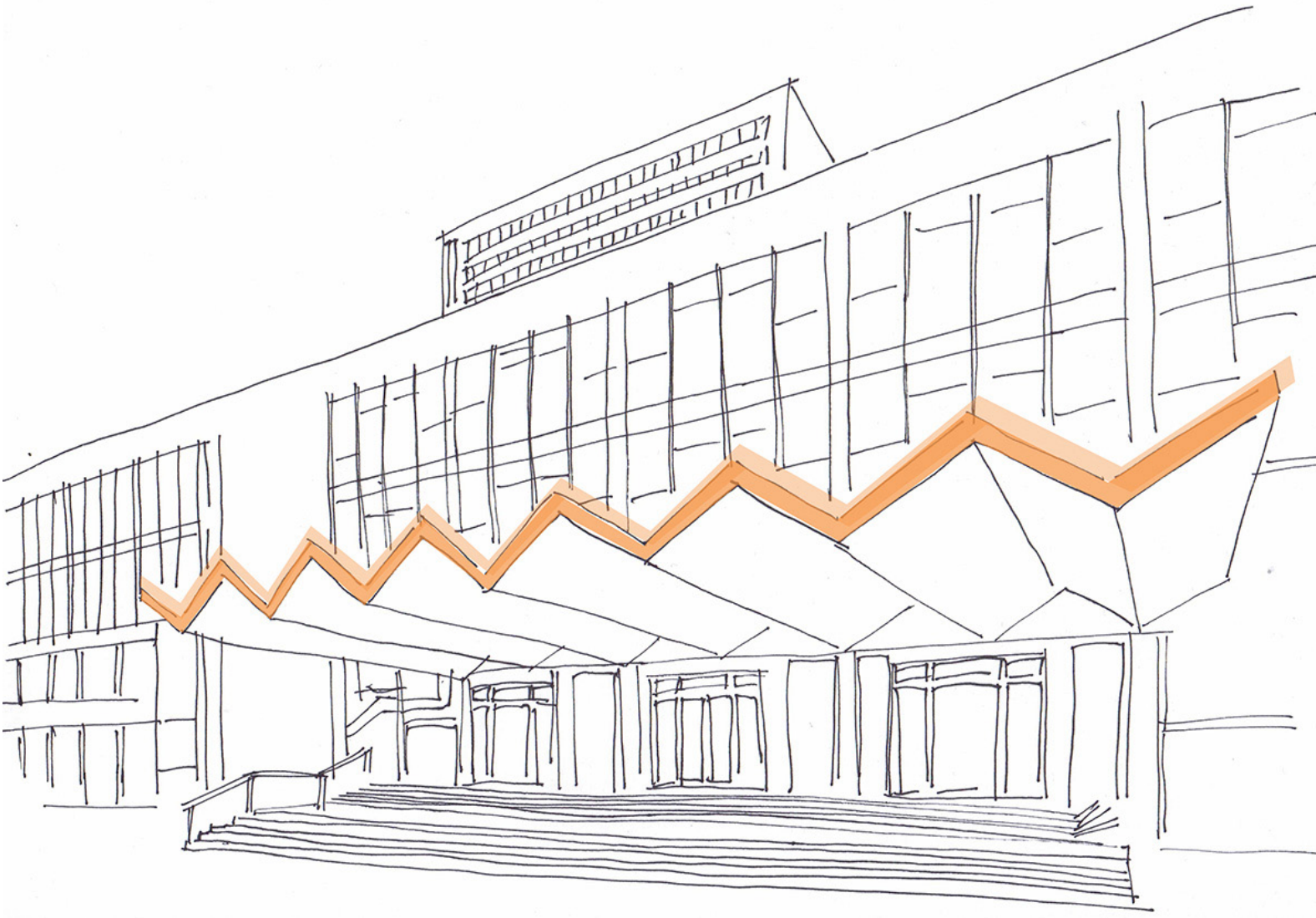
[11] HEAVISIDE, C., H. MACINTYRE a S. VARDOULAKIS 2017. The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Current environmental health reports* [online]. B.m.: Springer, 1.9., roč. 4, č. 3, s. 296–305. ISSN 21965412. Dostupné na: doi:10.1007/S40572-017-0150-3/FIGURES/1

[12] QI, J., L. DING a S. LIM 2020. Planning for cooler cities: A framework to support the selection of urban heat mitigation techniques. *Journal of Cleaner Production* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 275, s. 122903. ISSN 09596526. Dostupné na: doi:10.1016/j.jclepro.2020.122903

[13] ARMSON, D., M.A. RAHMAN a A.R. ENNOS 2013. A comparison of the shading effectiveness of five different street tree species in Manchester, UK. *Arboriculture and Urban Forestry* [online]. roč. 39, č. 4, s. 157–164. ISSN 02785226. Dostupné na: doi:10.48044/jauf.2013.021

[14] LOBACCARO, G. a J.A. ACERO 2015. Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons. *Urban Climate* [online]. B.m.: Elsevier, 1.12., roč. 14, s. 251–267. ISSN 2212-0955. Dostupné na: doi:10.1016/J.UCLIM.2015.10.002

[15] RAHMAN, M.A., L.M.F. STRATOPOULOS, A. MOSER-REISCHL, T. ZÖLCH, K.H. HÄBERLE, T. RÖTZER, H. PRETZSCH a S. PAULEIT 2020. Traits of trees for cooling urban heat islands: A meta-analysis. *Building and Environment* [online]. roč. 170, č. December 2019. ISSN 03601323. Dostupné na: doi:10.1016/j.buildenv.2019.106606



ISBN 978-80-227-5555-9

www.svf.stuba.sk