

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Stavebná fakulta
Katedra pozemného staviteľstva a urbanizmu

Autoreferát dizertačnej práce na získanie
akademického titulu „philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“

**VPLYV VETRANIA NA VNÚTORNÚ KLÍMU
PODKROVNÝCH PRIESTOROV PAMIATKOVO
CHRÁNENÝCH SAKRÁLNYCH STAVIEB**

Ing. Michal Poljak

Žilina jún 2025

Dizertačná práca bola vypracovaná v rámci denného doktorandského štúdia na Stavebnej fakulte Žilinskej univerzity v Žiline.

Predkladateľ: Ing. Michal Poljak
Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta
Katedra pozemného staviteľstva a urbanizmu
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Školiteľ: doc. Ing. Radoslav Ponechal, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta
Katedra pozemného staviteľstva a urbanizmu
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Oponenti: 1. prof. Ing. Pavol Ďurica, CSc.
Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta
Katedra pozemného staviteľstva a urbanizmu
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

2. prof. Ing. Jozef Štefko, CSc.
Technická univerzita vo Zvolene, Drevárska fakulta
Katedra drevených stavieb
T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen

3. prom. fyz. Oľga Koronthályová, CSc.

Autoreferát bol rozoslaný dňa
Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o hod. v zasadačke
dekanátu AE 307 na Stavebnej fakulte Žilinskej univerzity v Žiline, Univerzitná 8215/1, pred
komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou dňa

študijný odbor: stavebníctvo
študijný program: teória a konštrukcie pozemných stavieb

S dizertačnou prácou sa možno oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu
Stavebnej fakulty Žilinskej univerzity v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

predseda odborevej komisie
prof. Ing. Marián Drusa, PhD.

ÚVOD	4
1 PREDMET A CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	4
1.1 Vedecké ciele dizertačnej práce	4
1.2 Spoločenské ciele dizertačnej práce.....	5
2 PREHEAD SÚČASNÉHO STAVU POZNATKOV V RIEŠENEJ PROBLEMATIKE	5
2.1 Historické krovy	5
2.2 Stavebné drevo	6
2.3 Biologickí škodcovia	6
2.4 Vnútorná klíma podkrovných priestorov	8
3 TEORETICKÝ ZÁKLAD RIEŠENIA.....	8
3.1 Vlhkosť vzduchu	9
3.2 Vlhkosť dreva	9
4 EXPERIMENTÁLNE MONITOROVANIE MIKROKLÍMY PODKROVNÝCH PRIESTOROV	10
4.1 Metodický postup	10
4.2 Vyhodnotenie a interpretácia výsledkov	13
4.3 Čiastkový záver	18
5 DYNAMICKÉ SIMULÁCIE VETRANIA PODKROVNÝCH PRIESTOROV	18
5.1 Metodický postup	18
5.2 Vyhodnotenie a interpretácia výsledkov	22
5.3 Čiastkový záver	26
6 ZÁVER	27
6.1 Závery a význam pre vednú disciplínu	27
6.2 Závery a význam pre inžiniersku prax	28
VÝBER BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV	28
PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA.....	30

ÚVOD

Historické budovy predstavujú dôležitú súčasť nášho hmotného kultúrneho dedičstva a zohrávajú významnú úlohu vo vnímaní histórie a identity našich sídiel a krajiny. Jedným z charakteristických a výrazových prvkov budov sú strechy, ktoré nie sú len konštrukčnými časťami, ale majú aj významnú estetickú a kultúrnu hodnotu.

Jedným z aspektov starostlivosti o strechy historických budov je starostlivosť o vnútornú klímu podkrovných priestorov. Vnútorná klíma má priamy vplyv na životnosť historických drevených krovov. Preto je nevyhnutné venovať pozornosť mikroklimatickým podmienkam, ktoré môžu ovplyvniť stav dreva, a tým pádom aj celkový stav krovu. Priaznivé podmienky môžu prispieť k zachovaniu historických hodnôt, minimalizujú riziko degradácie dreva.

Zabezpečiť optimálnu vnútornú klímu v podkrovných priestoroch historických budov nie je len otázkou technickej správnosti, ale aj ochoty k ochrane kultúrneho dedičstva. Vetranie je jedným z najúčinnějších spôsobov, ako udržať vhodné klimatické podmienky.

V súčasnosti existuje niekoľko riešení, ktoré môžu byť implementované pre optimalizáciu vetrania podkrovných priestorov historických budov. Jedným z pokročilých prístupov je využitie počítačových simulácií, ktoré umožňujú modelovať vzduchový tok v podkrovných priestoroch a identifikovať optimálne riešenia pre udržanie priaznivej klímy.

V rámci dizertačnej práce sa tak pozornosť sústreďuje na monitorovanie podmienok mikroklimy v podkrovných priestoroch pamiatkovo chránených sakrálnych stavieb a tvorbu dynamických simulačných modelov vetrania.

1 PREDMET A CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Predmetom predloženej dizertačnej práce je teoreticko-experimentálna analýza vplyvu vetrania na vnútornú klímu podkrovných priestorov pamiatkovo chránených sakrálnych stavieb v podmienkach mierneho klimatického pásma. Práca kombinuje monitorovanie mikroklimatických podmienok a dynamické simulácie vetrania, pričom sa zameriava na zdokonalenie metodiky monitorovania mikroklimy, vytvorenie odladeného simulačného modelu vetrania podkrovného priestoru a formulovanie odporúčaní pre trvalo udržateľnú ochranu historických drevených krovov na základe simulačných experimentov.

1.1 Vedecké ciele dizertačnej práce

- Uskutočniť detailné experimentálne monitorovanie mikroklimy v podkrovných priestoroch troch sakrálnych, pamiatkovo chránených budov s nadväznosťou na analýzu a vyhodnotenie podmienok vnútorného prostredia.
- Zdokonaľiť metodiku monitorovania mikroklimy, použitých postupov a existujúceho systému kontinuálneho merania parametrov vnútorného prostredia v podkrovných priestoroch.
- Nadobudnúť spoľahlivú databázu údajov pre kalibrácie dynamických simulačných modelov a následné porovnávacie analýzy podkrovných priestorov.
- Vytvoriť validovaný a kalibrovaný dynamický simulačný model monitorovaného podkrovného priestoru podľa siete monitorovacích bodov v reálnom priestore pre následnú analýzu vplyvu vetrania na vnútornú klímu podkrovných priestorov pri rôznych alternatívach vetrania a konštrukčných zmenách.

1.2 Spoločenské ciele dizertačnej práce

- Nadviazať na stavebno-technický výskum v oblasti krovv, ktorý sa realizuje na Katedre pozemného staviteľstva a urbanizmu SvF UNIZA.
- Prispieť k zachovaniu historických krovv, a teda aj samotných budov, a tým aj k naplneniu cieľov agendy trvalej udržateľnosti a odolnosti budov voči vplyvu klimatických zmien.
- Rozšíriť poznatky v oblasti vnútorného prostredia budov obohatením znalostí o spôsobe a vplyve vetrania podkrovných priestorov.
- Poskytnúť odporúčania pre správne užívanie a údržbu podkrovných priestorov.

2 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNATKOV V RIEŠENEJ PROBLEMATIKE

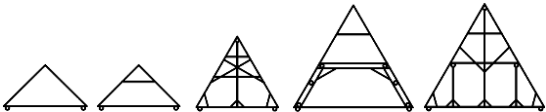
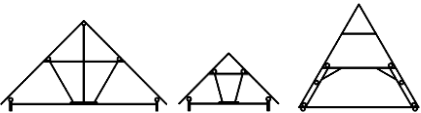
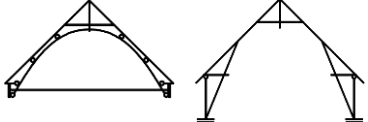
2.1 Historické krovy

Historické strechy sú často jedinečnými dielami remeselnej zručnosti ich tvorcov, okolitej tradície a vplyvu miestnej remeselnej výroby. Predstavujú nenahraditeľný zdroj poznania o vývoji staviteľstva a tesárskeho remesla, dokumentujú dobové techniky, spôsoby spájania a samotný konštrukčný návrh [1].

Za historické krovy možno považovať tie, ktoré boli vztýčené do konca 19. storočia, hoci ústup tradičných drevených krovv sa na našom území zavíšil až v 20. – 30. rokoch 20. storočia. Najstaršie zachované krovy boli na našom území zo smrekovca opadavého. Výber dreviny však úzko súvisel s jej dostupnosťou v konkrétnom regióne [2].

Historické krovy sa vyznačujú tvarovou a konštrukčnou rozmanitosťou. Pre poznanie krovných sústav je preto dôležité ich konštrukčno-typologické hľadisko (Tab. 2.1) [3].

Tab. 2.1 - Príklady historických krovv z konštrukčno-typologického hľadiska [3]

Historické krovy	Väzníkové krovy	
	Krokvové a hambáľkové krovy	
	Prechodové krovy	
	Väzníkové krovy	
	Ostatné krovy	

2.2 Stavebné drevo

Drevo je organický, heterogénny a anizotropný materiál s vysokou variabilitou vlastností v závislosti od druhu dreveniny. Zároveň patrí medzi hygroskopické materiály. Vo vhodných podmienkach je veľmi trvanlivé, no v nevhodnom prostredí podlieha rýchlej skaze (Tab. 2.2).

Tab. 2.2 - Trvanlivosť niektorých druhov dreva v rôznych podmienkach expozície [4]

Podmienky expozície	Druh dreva				
	Jedľa	Smrek	Borovica	Buk	Dub
Drevo vystavené atmosférickým podmienkam v styku so zeminou	5 – 10 r.	5 – 10 r.	5 – 10 r.	5 r.	15 – 25 r.
Drevo vystavené vode	60 r.	70 r.	500 r.	10 r.	700 r.
Drevo vystavené stálemu suchu	900 r.	900 r.	1000 r.	800 r.	1800 r.
Drevo vystavené nepohybujúcemu sa vzduchu	20 r.	25 r.	120 r.	5 r.	200 r.
Drevo vystavené pohybujúcemu sa vzduchu	45 r.	50 r.	80 r.	10 r.	120 r.

V záujme zabezpečenia vhodného prostredia v podkrovných priestoroch je potrebné dodržiavať zásady konštrukčnej ochrany dreva. Konštrukčná ochrana pozostáva z riešení, ktoré umožňujú odvetrávať plochy drevených prvkov, izolovať drevené prvky od styku s okolitými nedrevenými materiálmi a ponechať funkčný pôvodný systém prevetrávania [1]. Možno ju doplniť preventívnou chemickou ochranou.

2.3 Biologickí škodcovia

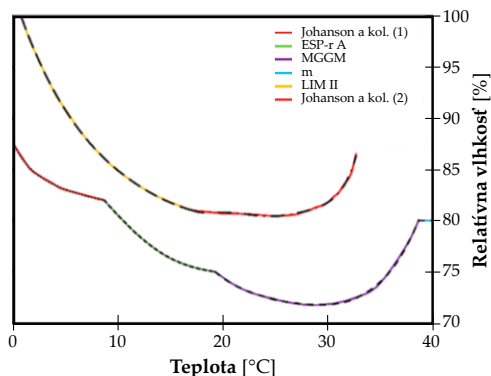
V našich klimatických podmienkach ohrozujú drevené konštrukcie drevokazné huby, nasledované drevokazným hmyzom. Významnosť jednotlivých skupín biologických škodcov sa však môže líšiť v závislosti od geografickej polohy a miestneho ekosystému (Tab. 2.3).

Tab. 2.3 - Riziko napadnutia dreva biologickými škodcami [5]

Biologickí škodcovia		Trieda použitia dreva				
		I	II	III	IV	V
Baktérie		•	•	•	●	●
Plesne		•	•	•	●	●
Drevokazné huby	Huby mäkkej hniloby	•	•	•	●	●
	Huby hnejdej a bielej hniloby	•	•	•	●	●
	Fúzače	●	●	●	●	•
Drevokazný hmyz	Črvotoče	●	●	●	●	•
	Hrbániky	●	●	•	•	•
	Tikotníky	•	•	•	●	•
Riziko napadnutia:		• zanedbateľné,	• nízke,	• stredné,	● vysoké.	

2.3.1 Životné podmienky plesní

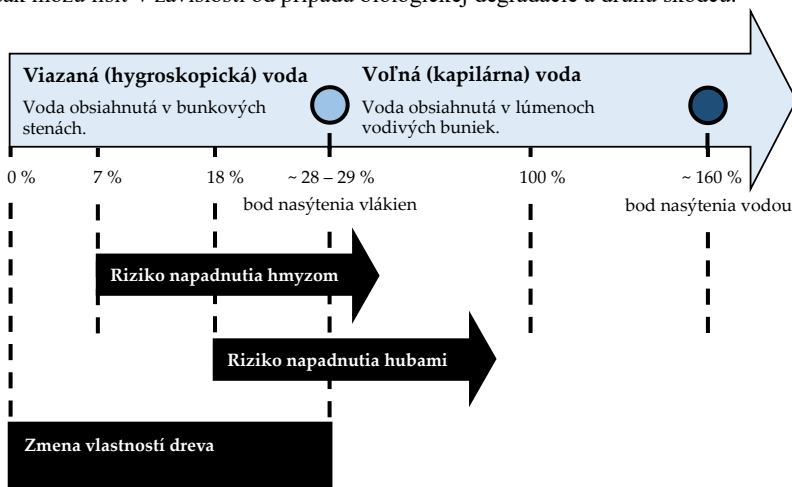
Rast plesní je špecifickou reakciou na určité tepelno-vlhkostné podmienky a vlastnosti substrátu. V priebehu posledných desaťročí bolo navrhnutých niekoľko rôznych modelov na predpovedanie rizika rastu plesní (Obr. 2.1) [6]. Napriek tomu v rámci vedeckej komunity neexistuje jednotný konsenzus o ich aplikácii, predovšetkým z dôvodu rôznych zjednodušení a predpokladov, ktoré boli do týchto modelov zahrnuté.



Obr. 2.1 - Prispôsobenie rôznych modelov predpovedania rizika plesní [7]

2.3.2 Životné podmienky drevokazných húb a drevokazného hmyzu

Početnosť a charakter poškodenia spôsobeného drevokaznými hubami a hmyzom súvisí s klimatickými podmienkami. Prevencia voči rozvoju drevokazných húb by mala byť založená na znížení vlhkosti dreva pod 18 %, v prípade hmyzu pod 7 % (Obr. 2.2) [8]. Hranice sa však môžu líšiť v závislosti od prípadu biologickej degradácie a druhu škodcu.



Obr. 2.2 - Vplyv rozsahu vlhkosti dreva na jeho zraniteľnosť [9], upravené podľa [8]

2.4 Vnútna klíma podkrovných priestorov

Podkrovné priestory historických budov sú zvyčajne nevyužívané. Jediné nároky na tieto priestory sú vzťahnuté k snahe predĺžiť životnosť historických krovových konštrukcií v zmysle vytvorenia priaznivých mikroklimatických podmienok [10].

V prípade biologickej degradácie drevených prvkov je kľúčovým faktorom dostatočné množstvo vody a vzduchu v dreve [11]. Významnú úlohu zohráva aj čas expozície a dynamika zmien [12]. Na mikroklimu vplyvajú aj ďalšie fyzikálne či materiálové parametre [13].

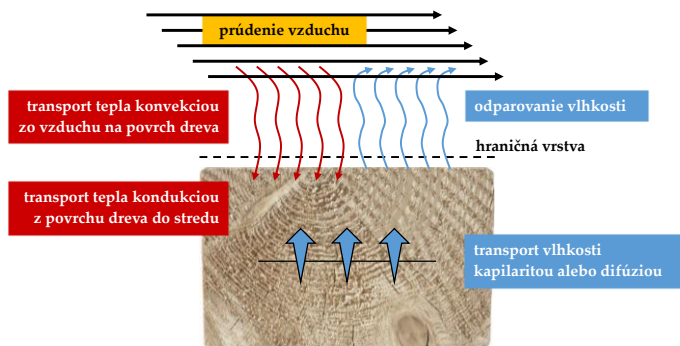
V podkroviach historických budov sú podmienky ovplyvnené konštrukčným vyhotovením strechy, spôsobom jej prevetrávania a podmienkami vonkajšieho prostredia [14]. Dôležitú úlohu zohráva tiež orientácia na svetové strany [15], vlastnosti strešnej krytiny [16], akumulačná schopnosť stien a stropov [17], spôsob užívania a obsadenosť budovy.

V širšom kontexte závisí vnútorná klíma aj od geografickej polohy a biotopu [5], kyslosti dreveného substrátu [8], drsnosti povrchov [6] a prítomnosti kôry na drevených prvkoch [1]. Vplyv má tiež občasná prítomnosť ľudí [18], neporiadok a biologický odpad v podkroví [2].

Jednou z pomerne nových výziev je zmena klímy. V tejto súvislosti treba zohľadniť vplyv znečistenia ovzdušia prachovými časticami [19]. Výskumné projekty ako *Noah's Ark* [20] či *Climate for Culture* [21] upozorňujú na nárast teploty vzduchu pri zachovaní priemernej úrovne relatívnej vlhkosti. Vplyv zmeny klímy však poukazuje na nárast povrchovej teploty a mierny pokles relatívnej vlhkosti vzduchu pri povrchu prvkov. Zmena klímy môže zároveň ovplyvniť rozsah výskytu biologických škodcov a ich spoločenstiev.

3 TEORETICKÝ ZÁKLAD RIEŠENIA

Sušenie dreva predstavuje proces odstraňovania nadbytočnej vlhkosti dreva pomocou vzduchu (Obr. 3.1). Má zásadný význam pre trvanlivosť dreva.



Obr. 3.1 - Procesy transportu tepla a vlhkosti v kontexte prúdenia vzduchu [22]

Na základe Taylor-Mitchellovej rovnice [23] možno proces sušenia dreva vyjadriť ako:

$$D = 28,7624 - 0,5906 \cdot v_a - 0,1552 \cdot w_w - 0,0977 \cdot \theta \quad (3.1)$$

kde: D je čas sušenia dreva [h];
 v_a je rýchlosť prúdenia vzduchu [m/s];
 w_w je priemerný obsah vlhkosti dreva [%];
 θ je teplota vzduchu [°C].

3.1 Vlhkosť vzduchu

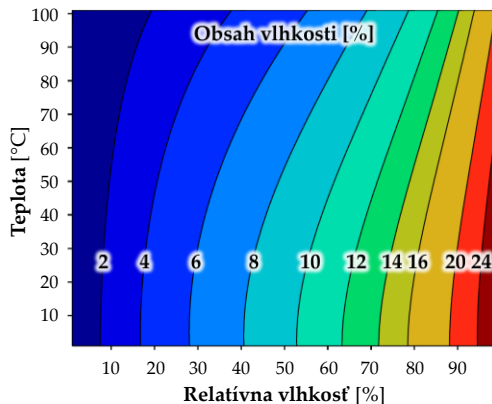
Atmosférický vzduch sa považuje za zmes suchého vzduchu a vodnej pary. Pri hodnotení vplyvu vetrania na vnútorné prostredie je potrebné zadefinovať mernú vlhkosť vzduchu [24]. Ide o odvodenú veličinu, ktorá sa používa v tvare:

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_v}{p - p_v} \quad (3.2)$$

kde: x je merná vlhkosť vzduchu [kg/kg];
 p_v je parciálny tlak vodnej pary vo vzduchu [Pa];
 p je celkový tlak vlhkého vzduchu [Pa].

3.2 Vlhkosť dreva

Pri kontakte so vzduchom sa drevené prvky snažia prostredníctvom sorpcie dosiahnuť rovnovážny obsah vlhkosti. Tento proces sorpcie možno vyjadriť grafickou (Obr. 3.2) alebo matematickou interpretáciou sorpčných izoteriem.



Obr. 3.2 - Diagram rovnovážneho obsahu vlhkosti [25]

Za jeden z prvých modelov na odhad rovnovážneho obsahu vlhkosti možno považovať Anderson-McCartyho sorpčný model [26], ktorý má tvar:

$$w = - \frac{\ln \left[- \frac{\ln(\varphi)}{A} \right]}{B} \quad (3.3)$$

kde: w je rovnovážny obsah vlhkosti dreva [%];
 φ je relatívna vlhkosť vzduchu [%]/100;
 A a B sú koeficienty, ktoré reprezentujú vplyv teploty.

Najpoužívanejším modelom je Hailwood-Horrobinov sorpčný model [27], ktorý má tvar:

$$w = \frac{1800}{W} \cdot \left[\frac{K \cdot \varphi}{1 - K \cdot \varphi} + \frac{K_1 \cdot K \cdot \varphi + 2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K^2 \cdot \varphi^2}{1 + K_1 \cdot K \cdot \varphi + K_1 \cdot K_2 \cdot K^2 \cdot \varphi^2} \right] \quad (3.4)$$

kde: w je rovnovážny obsah vlhkosti dreva [%];
 φ je relatívna vlhkosť vzduchu [%]/100;
 W , K , K_1 a K_2 sú koeficienty, ktoré reprezentujú vplyv teploty.

Ako alternatívu možno použiť tiež aj Hendersonov sorpčný model [28], ktorý má tvar:

$$w = 100 \cdot \int -0,000612 \cdot T_t \cdot \left(1 - \frac{T_t}{647,1}\right)^{2,43} \cdot \ln(1 - \varphi) \int^{0,0577 \cdot T^{0,43}} \quad (3.5)$$

kde: w je rovnovážny obsah vlhkosti dreva [%];

T_t je termodynamická teplota [K];

φ je relatívna vlhkosť vzduchu [%]/100.

V našich klimatických podmienkach môže rovnovážny obsah vlhkosti v nevysušovaných podkroviach dosahovať hodnoty od 9 do 22 % [2]. Vlhkosť a jej kolísanie sa tiež môže líšiť medzi povrchom a hĺbkou prvků, pričom rozdiely bývajú bežne nad 4 % [16].

4 EXPERIMENTÁLNE MONITOROVANIE MIKROKLÍMY PODKROVNÝCH PRIESTOROV

Jedným z hlavných zámerov dizertačnej práce bolo experimentálne in situ monitorovanie mikroklímy v podkrovných priestoroch troch sakrálnych budov, evidovaných v Registri nehnuteľných národných kultúrnych pamiatok Slovenskej republiky [29]. Práca sa preto zamerala na podkrovné priestory kostolov reprezentujúcich rôzne historické obdobia a typologicky odlišné príklady sakrálny architektúry, menovite na:

- Rímskokatolícky kostol sv. Imricha v Žiline-Bytčici (ďalej len „v Bytčici“);
- Rímskokatolícky kostol sv. Barbory v Žiline;
- Rímskokatolícky kostol Najsvätejšieho Tela Kristovho v Belej-Duliciach.

Cieľom tejto časti dizertačnej práce bolo analyzovať a vyhodnotiť mikroklimatické podmienky v podkrovných priestoroch uvedených kostolov so zreteľom na rozdiely v ich stavebnom usporiadaní a režimoch vetrania. Okrem toho bolo významným cieľom aj zdokonalenie metodiky monitorovania, použitých postupov a systému kontinuálneho merania parametrov vnútorného prostredia v podkrovných priestoroch.

4.1 Metodický postup

4.1.1 Kostol sv. Imricha, Bytčica

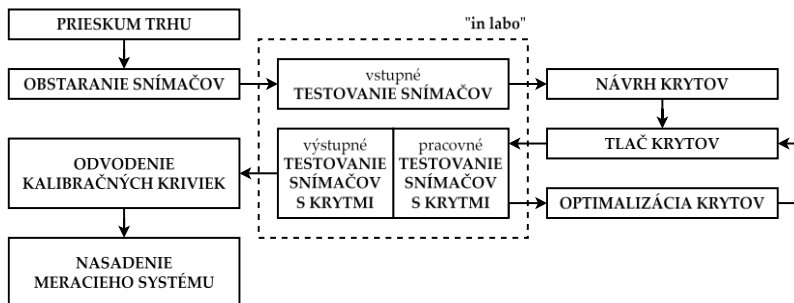
Klasicistický Kostol sv. Imricha (Obr. 4.1) z roku 1844 predstavuje typový vidiecky kostol, rozšírený na území bývalého Československa.



Obr. 4.1 - Kostol sv. Imricha (vľavo: exteriérový pohľad; vpravo: pohľad do podkrovia)

Vývoj meracieho systému

Vývoj meracieho systému predstavoval prípravnú fázu mikroklimatického monitorovania, pričom prebiehal v niekoľkých na seba nadväzujúcich krokoch (Obr. 4.2). Systematický prístup zabezpečil, že výsledný systém spĺňal požiadavky na presnosť merania, stabilitu a odolnosť voči kritickým podmienkam v prostredí historických podkrovných priestorov.



Obr. 4.2 - Bloková schéma vývoja meracieho systému

Navrhnutý merací systém využil bezdrôtové snímače Sensirion SHT4x Smart Gadget, ktoré sú primárne dodávané ako vývojové prostriedky. Preto bolo potrebné navrhnuť vhodné ochranné kryty. Jednotlivé verzie krytov tak boli modelované v softvéri SketchUp, vytlačené pomocou FDM 3D tlače, testované v klimatickej komore a postupne optimalizované. Snímače boli podrobené niekoľkokodenným testovacím cyklom v klimatickej komore, pri ktorých boli vystavené kombináciám teplôt od -30 do 70 °C a relatívnych vlhkostí od 6 do 100 %.

Predbežný zber mikroklimatických údajov

Prvou fázou mikroklimatického monitorovania bol predbežný zber údajov. Cieľom bolo overenie funkčnosti meracieho systému a jeho doladenie. Prístrojová technika pozostávala z 15 snímačov teploty a relatívnej vlhkosti a vpichového vlhkomera (Tab. 4.1).

Tab. 4.1 - Prístrojová technika z prvej fázy mikroklimatického monitorovania

Sledovaný parameter	Meracie zariadenie		Časový rámec	
	Model	Presnosť	Obdobie	Frekvencia
teplota vzduchu	Sensirion SHT4x	±1,0 °C	22.2.24 – 14.3.24	10 min
relatívna vlhkosť vzduchu	Smart Gadget	±5,0 %		1 h
povrchová vlhkosť dreva	Habotest HT633	±2,0 %	22.2.24 – 14.3.24	konkrétny čas

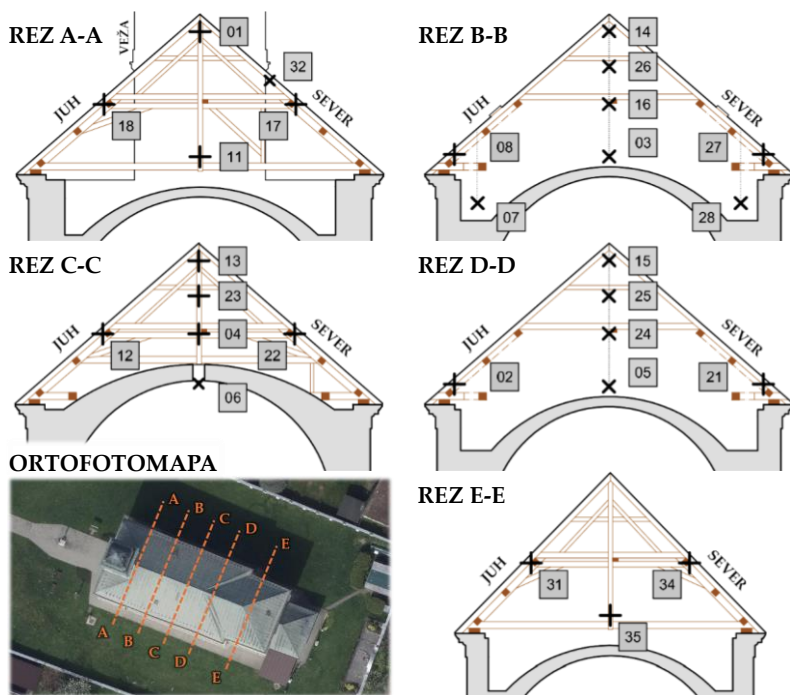
Komplexné monitorovanie podkrovného priestoru

Na základe poznatkov z predchádzajúcej fázy mohla nasledovať druhá etapa výskumu, teda komplexné mikroklimatické monitorovanie. Jeho cieľom bolo dlhodobé a detailné sledovanie podmienok v podkrovnom priestore. V tejto fáze pozostávala prístrojová technika z viacerých meracích zariadení (Tab. 4.2). Počet snímačov bol navýšený na 28 (Obr. 4.3).

V rámci pravidelných návštev podkrovného priestoru sa vykonávali opakované merania povrchovej vlhkosti dreva. V júli a auguste prebehlo testovanie rôznych konfigurácií vetrania. Začiatkom septembra sa uskutočnila inovatívna vizualizácia pohybov vzduchu pomocou dymového generátora a napokon bola počas zimného dňa využitá termovízna kamera.

Tab. 4.2 - Prístrojová technika z druhej fázy mikroklimatického monitorovania

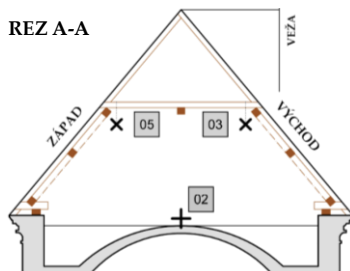
Sledovaný parameter	Meracie zariadenie		Časový rámec	
	Model	Presnosť	Obdobie	Frekvencia
teplota vzduchu	Sensirion SHT4x	$\pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$	15.3.24 – 16.3.25	1 h
relatívna vlhkosť vzduchu	Smart Gadget	$\pm 5,0\text{ }\%$		
teplota vzduchu	Sencor SWS 9898	$\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	15.3.24 – 16.3.25	10 min
relatívna vlhkosť vzduchu		$\pm 6,5\text{ }\%$		
tlak vzduchu		$\pm 8\text{ hPa}$		
rýchlosť vetra		$\pm 0,50\text{ m/s}$		
smer vetra		-		
úhln zrážok		$\pm 0,40\text{ mm}$		
vlhkosť dreva	Habotest HT633	$\pm 2,0\text{ }\%$	15.3.24 – 16.3.25	konkrétny čas
rýchlosť prúdenia vzduchu	Testo 440 s hot-wire sondou	$\pm 0,03\text{ m/s}$	14.8.24 – 15.8.24 4.9.24	1 min 1 s
priestorové pohyby vzduchu	ADJ VF1300	-	4.9.24	konkrétny čas
povrchové teplotné polia	Fluke Ti400	$\pm 2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$	21.1.25	konkrétny čas



Obr. 4.3 - Schéma meracích bodov v podkroví Kostola sv. Imricha

4.1.2 Kostol sv. Barbory, Žilina

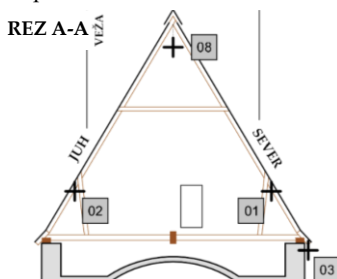
Barokový Kostol sv. Barbory (Obr. 4.4) z roku 1730 predstavuje typický františkánsky kostol s kláštorňou budovou a pristavanou vežou.



Obr. 4.4 - Kostol sv. Barbory (vľavo: exteriérový pohľad; vpravo: schéma meracích bodov)

4.1.3 Kostol Najsvätejšieho Tela Kristovho, Belá-Dulice

Ranogotický Kostol Najsvätejšieho Tela Kristovho (Obr. 4.5) z konca 13. storočia predstavuje typ turčianskych ranogotických kostolov s predstavanou vežou zo 17. storočia.



Obr. 4.5 - Kostol Najsvätejšieho Tela Kristovho (vľavo: exteriérový pohľad; vpravo: schéma meracích bodov)

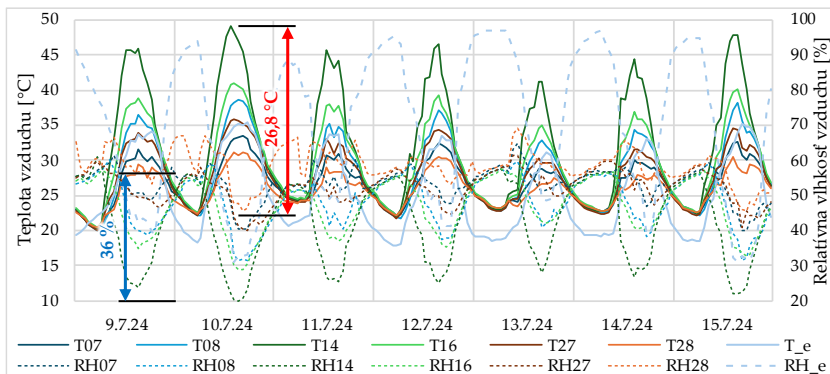
4.2 Vyhodnotenie a interpretácia výsledkov

4.2.1 Klimatické okrajové podmienky

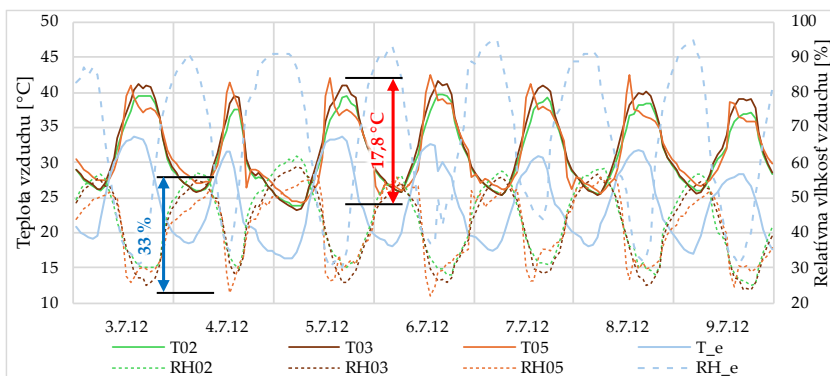
Na vnútornú klímu podkrovných priestorov majú významný vplyv vonkajšie klimatické podmienky. Dôležitou okrajovou podmienkou sú aj tepelno-vlhkostné pomery v interiéroch kostolov. Dôležité sú tiež podmienky vo vetraných častiach, ktoré sú prepojené s podkrovím.

4.2.2 Teplota a relatívna vlhkosť vzduchu v podkrovných priestoroch

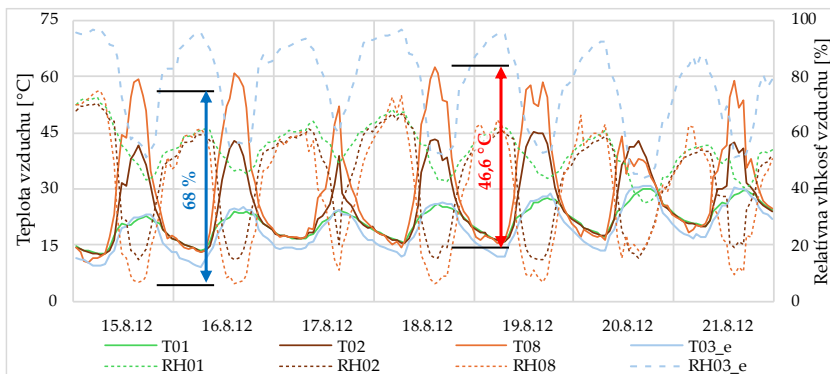
Tepelno-vlhkostná mikroklima v podkrovných priestoroch troch kostolov bola hodnotená z hľadiska sezónnosti počas typických letných (Obr. 4.6) (Obr. 4.7) (Obr. 4.8) a zimných týždňov v podkrovných priestoroch Kostola sv. Imricha, Kostola sv. Barbory a Kostola Najsvätejšieho Tela Kristovho.



Obr. 4.6 - Trendy teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v letný týždeň (Bytčica)



Obr. 4.7 - Trendy teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v letný týždeň (Žilina)



Obr. 4.8 - Trendy teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v letný týždeň (Belá-Dulice)

4.2.3 Rovnovážny obsah vlhkosti dreva v podkrovných priestoroch

Celoročný priebeh v Bytčici

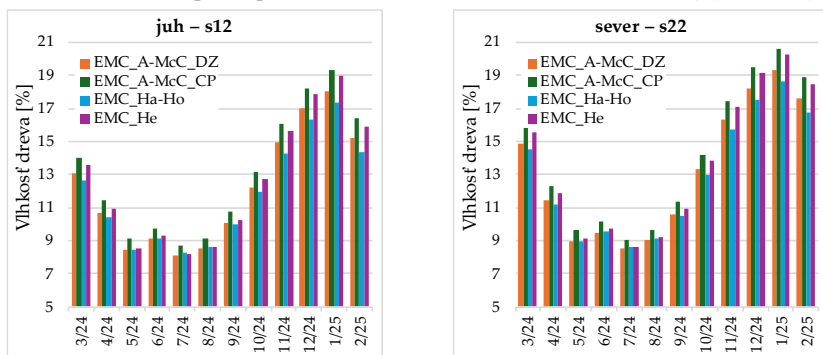
V podkrovnom priestore bol najvýraznejší pokles obsahu vlhkosti dreva zaznamenaný od marca do mája. V priebehu júna došlo k pozvoľnému nárastu, ktorý sa však v júli prakticky anuloval. Od augusta začala vlhkosť dreva narastať až do januára. Z priestorového hľadiska boli najpriaznivejšie podmienky v hrebeni. Naopak, najvlhšie boli severné časti (Tab. 4.3).

Tab. 4.3 - Mesačné priemery rovnovážnej vlhkosti dreva v rezoch B-B a D-D podľa Hailwood-Horrobina (Bytčica)

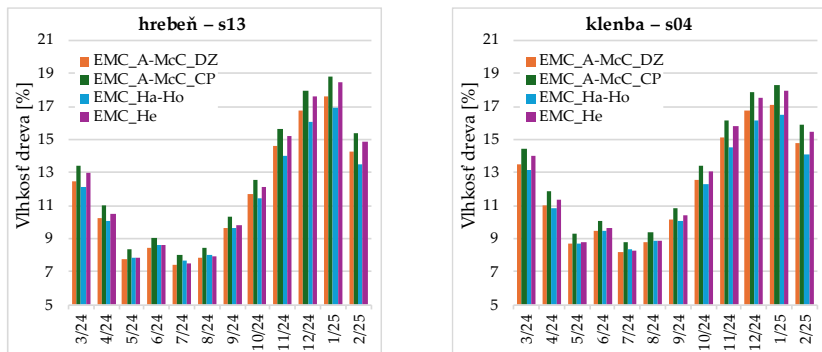
Rok		2024										2025	
Mesiac		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
EMC [%]	odkvap juh B-B	12,2	10,3	8,7	9,4	8,5	8,8	10,0	11,8	14,0	16,1	17,5	13,8
	odkvap sever B-B	15,0	11,4	9,2	9,9	9,0	9,6	9,7	14,1	17,0	18,8	20,1	18,8
	hrebeň B-B	12,0	9,9	7,9	8,6	7,7	8,0	9,5	11,4	13,9	16,2	17,1	13,6
	klenba B-B	12,9	10,5	8,8	9,6	8,7	9,2	10,5	12,8	15,3	17,5	18,7	15,8
	odkvap juh D-D	12,2	10,2	8,5	9,2	8,3	8,7	8,6	12,1	14,9	17,0	18,0	14,7
	odkvap sever D-D	16,1	11,9	9,1	9,7	8,8	9,4	11,2	14,4	17,8	19,5	20,8	19,1
	hrebeň D-D	12,4	10,1	7,8	8,6	7,7	8,1	9,7	11,6	14,4	16,8	17,7	14,4
	klenba D-D	13,2	10,7	8,6	9,3	8,5	9,0	10,4	12,7	15,4	17,5	18,4	15,9

Pri porovnaní priečných rezov B-B a D-D bol sledovaný vplyv zmeny tvaru strechy, teda najmä nároží a úžľabí, na rovnovážny obsah vlhkosti dreva. Pri priečných rezoch A-A a C-C bol zas hodnotený vplyv vetracích otvorov a masívnych konštrukcií.

Pre zobrazenie vzájomných rozdielov medzi modelmi boli v reze C-C porovnané mesačné priemery teoretického rovnovážneho obsahu vlhkosti dreva. Teoretické hodnoty kolísali v približne od 8 do 21 %. Rozdiely medzi modelmi dosahovali maximálne až 2 %. Najmenej výrazné kolísanie bolo pri sorpčnom modeli Hailwood-Horrobina (Obr. 4.9) (Obr. 4.10).



Obr. 4.9 - Rozdiely mesačných priemerov rovnovážnej vlhkosti dreva pri južnom a severnom odkvape (Bytčica)



Obr. 4.10 – Rozdiely mesačných priemerov rovnovážnej vlhkosti dreva pri hrebeni a klenbe (Bytčica)

Celoročný priebeh v Žiline

Rovnovážny obsah vlhkosti dreva klesal v podkrovnom priestore od januára do mája. V júni mierne vzrástol, no vzápätí v júli poklesol a dosiahol minimálnu úroveň. Po zvyšok roka možno predpokladať nárast vlhkosti dreva. Z priestorového hľadiska boli najvyššie výkyvy dosiahnuté pri hambáľkoch na západnej strane, zatiaľ čo najstabilnejšie podmienky boli v blízkosti stropných klenieb (Tab. 4.4).

Tab. 4.4 – Mesačné priemery rovnovážnej vlhkosti dreva v reze A-A podľa Hailwood-Horrobina (Žilina)

Rok		2012											
Mesiac		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EMC [%]	hambál. západ	21,6	17,9	13,7	10,7	8,7	9,8	8,1	–	–	–	–	–
	hambál. východ	20,4	16,8	13,7	10,9	8,8	9,8	8,2	–	–	–	–	–
	klenba	17,4	16,2	15,3	13,1	8,7	10,3	8,4	–	–	–	–	–

Celoročný priebeh v Belej-Duliciach

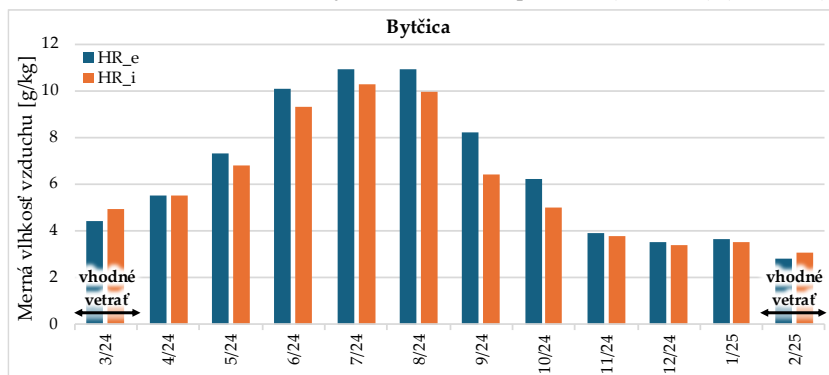
Rovnovážny obsah vlhkosti dreva vo vetranom podkrovnom priestore klesal počas apríla a mája. V júni vzrástol, no počas júla a augusta obnovil pokles. Následne, od septembra bolo možné pozorovať rastúcu vlhkosť dreva. Počas roka sa najvyššie vlhkosti dreva vyskytli pri severnom odkvape, zatiaľ čo najnižšie boli pri strešnom hrebeni (Tab. 4.5).

Tab. 4.5 – Mesačné priemery rovnovážnej vlhkosti dreva v reze A-A podľa Hailwood-Horrobina (Belá-Dulice)

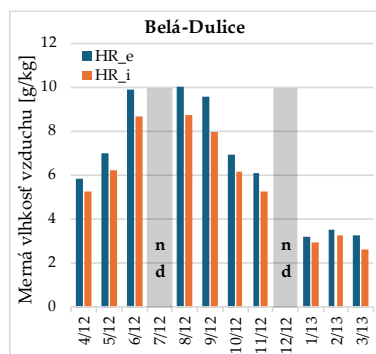
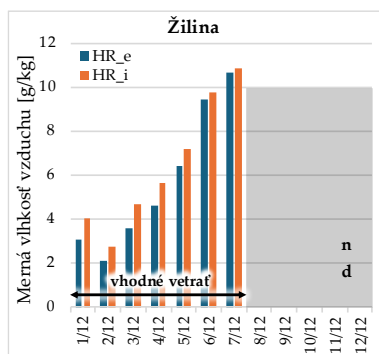
Rok		2012										2013		
Mesiac		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
EMC [%]	odkvap juh	9,1	8,4	10,6	–	8,3	10,4	12,3	15,6	–	17,4	–	11,3	
	odkvap sever	10,1	9,8	11,3	10,4	9,7	11,9	14,0	–	–	18,8	–	12,7	
	hrebeň	9,0	8,2	10,5	9,1	7,7	10,0	12,4	16,0	–	18,1	15,2	11,4	

4.2.4 Merná vlhkosť vzduchu vo vonkajšom a vnútornom prostredí

Vhodnosť vetrania podkrovných priestorov bola posúdená na základe rozdielu medzi mernou vlhkosťou vzduchu vo vonkajšom a vnútornom prostredí (Obr. 4.11) (Obr. 4.12).



Obr. 4.11 - Mesačné priemery mnej vlhkosti vzduchu (Bytčica)



Obr. 4.12 - Mesačné priemery mnej vlhkosti vzduchu (Žilina, Belá-Dulice)

Dosiahnuté výsledky možno interpretovať z dvoch hľadísk. Z hľadiska klimatických podmienok nebolo v Bytčici potrebné zvyšovať prevetrávanie podkrovného priestoru takmer po celý rok. Vetrание sa však javilo prínosné koncom zimy a začiatkom jari. V Žiline vykazovalo vetranie vonkajším vzduchom priaznivý efekt počas celého sledovaného obdobia, čo pravdepodobne súviselo s vyššou vlhkosťou záťažou. V Belej-Duliciach bol podkrovný priestor prirodzene dobre prevetrávaný. Výsledky preto nepreukázali potrebu zvyšovania intenzity vetrania. Z hľadiska spoľahlivosti meraní bol v Bytčici použitý vyladený merací systém s veľkým počtom kalibrovaných snímačov. Vysoká presnosť údajov tak umožňuje spoľahlivú interpretáciu. V Žiline boli použité snímače s neznámou presnosťou a výpadkami. Preto je potrebné výsledky interpretovať s vyššou mierou opatrnosti. V Belej-Duliciach boli použité meracie systémy s odlišnou presnosťou, časovým krokom a výpadkami. Interpretácia výsledkov si preto vyžaduje opatrný prístup.

4.3 Čiastkový záver

Realizované experimentálne monitorovanie mikroklimy preukázalo, že vnútorná klíma podkrovných priestorov je výsledkom komplexnej interakcie medzi vonkajšími klimatickými podmienkami, prevádzkou kostola, konštrukčným riešením a úrovňou vetrania.

Najrozsiahlejšie merania prebehli v podkrovnom priestore Kostola sv. Imricha, kde bol inštalovaný bezdrôtový merací systém. Použitý systém bol pred nasadením opakovane testovaný a kalibrovaný, čo prispelo k spoľahlivosti získaných údajov. Vykonané merania boli doplnené o sledovanie dynamiky prúdenia vzduchu počas leta a infiltrácie z priestoru kostola počas zimy. V prípade podkrovných priestorov Kostola sv. Barbory a Kostola Najsvätejšieho Tela Kristovho boli spracované dáta z predchádzajúcich rokov.

Vyhodnotenie poukázalo na výrazné vertikálne a priestorové rozdiely v rozložení teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v podkrovných priestoroch. V blízkosti hrebeňa boli počas leta zaznamenané teploty do 60 °C pri relatívnych vlhkostiach pod 10 %. Spodné časti, najmä severné, vykazovali v zime stabilne vlhké prostredie s relatívnou vlhkosťou nad 80 %.

Teoretický rovnovážny obsah vlhkosti dreva umožnil odhadnúť chod vlhkosti dreva. Vlhkosť dreva na jar výrazne klesala a v lete dosahovala približne 8 %. Počas jesene narastala a v zime dosahovala približne 21 %. Vyššie vlhkosti dreva boli typické pre spodné a severné časti, ako aj pre menej vetrané priestory a oblasti pri masívnych stenách.

Analýza mernej vlhkosti vzduchu ukázala, že efektívne odvetranie vlhkosti závisí najmä od správneho načasovania vzhľadom na vonkajšie klimatické podmienky.

Záverom možno konštatovať, že systematické monitorovanie prinieslo dôležité poznatky nielen o súčasnom stave mikroklimy v podkroviach, ale aj o metódach a technológiách, ktoré možno v budúcnosti aplikovať pri ďalších objektoch kultúrneho dedičstva.

5 DYNAMICKE SIMULÁCIE VETRANIA PODKROVNÝCH PRIESTOROV

Ďalším zo zámerov dizertačnej práce bolo analyzovať vplyv vetrania na vnútornú klímu podkrovných priestorov prostredníctvom počítačových simulácií. Pozornosť sa sústredila na rôzne prevádzkové podmienky a vonkajšiu klímu, vetracie režimy a konštrukčné zmeny.

Simulácie boli realizované v simulačnom softvéri DesignBuilder. Prvotné modely slúžili na overenie základných fyzikálnych princípov v idealizovaných priestoroch. Následne boli spracované viaceré podrobné modely podkrovného priestoru Kostola sv. Imricha v Bytčici, ktoré boli validované a kalibrované na základe údajov z vykonaného monitorovania.

Cieľom tejto časti dizertačnej práce bolo vyhodnotiť vplyv rôznych možností vetrania, so zreteľom na ochranu drevených prvkov krovu v kontexte ich prirodzeného sušenia.

5.1 Metodický postup

5.1.1 Tvorba klimatického roka

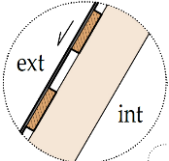
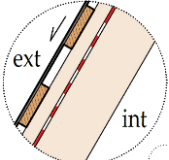
Pre potreby kalibrácie detailných simulačných modelov boli klimatické údaje z rokov 2024 a 2025 spracované do podoby vlastného klimatického roka. Meteorologické údaje zo stanice v Bytčici a v areáli UNIZA boli agregované do hodinového kroku, časovo zosúladené a transformované do formátu kompatibilného s výpočtovým jadrom EnergyPlus.

5.1.2 Vplyv vetrania pri rôznych konštrukčných zmenách

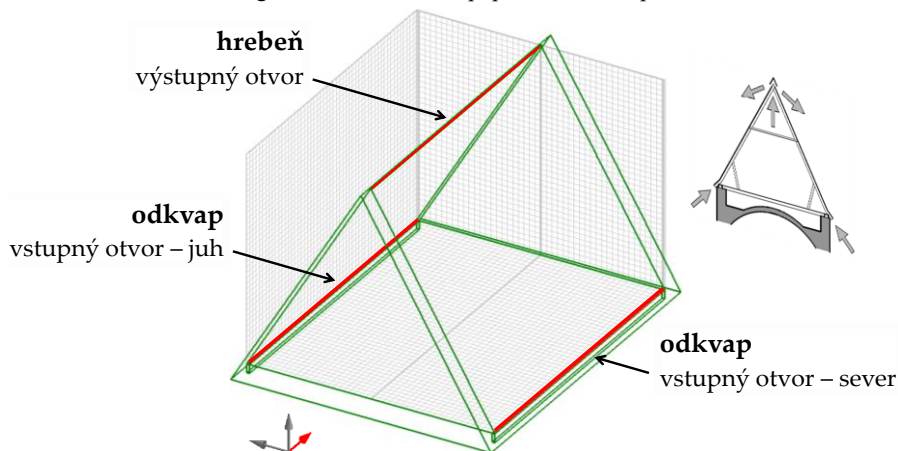
Zámerom tejto časti bolo analyzovať vplyv difúznej fólie v skladbe strešného plášt'a na charakter a intenzitu prúdenia vzduchu v podkrovných priestoroch. Pre tento účel tak boli vykonané dynamické simulácie a simulácie prúdenia vzduchu v modelovom priestore.

Simulačný model bol koncipovaný ako jednoduchý, idealizovaný podkrovný priestor s obdĺžnikovou základňou a sedlovou strechou. Štitové steny a strop boli kamenné, pričom strop nebol uvažovaný ako klenbový. Strešný plášť sa uvažoval v dvoch variantoch (Tab. 5.1). Vetranie bolo zabezpečené kombináciou vetracích otvorov pri odkvapoch a v hrebeni strechy.

Tab. 5.1 - Varianty strešného plášt'a s radením vrstiev z exteriéru

Variant 1		- strešná krytina z pozinkovaného plechu - častočné debnenie zo smrekového dreva resp. vetraná vzduchová medzera	0,7 mm 25,0 mm
Variant 2		- strešná krytina z pozinkovaného plechu - častočné debnenie zo smrekového dreva resp. vetraná vzduchová medzera - kontralaty zo smrekového dreva resp. vetraná vzduchová medzera poistná difúzna fólia	0,7 mm 25,0 mm 40,0 mm 0,3 mm

Klimatické údaje použité v dynamických simuláciách boli odvodené z referenčného skúšobného roka pre lokalitu Ostrava. Simulácie prúdenia vzduchu boli vykonané pre letný deň, 5.8. o 12.00 h a 19.00 h, na základe metódy konečných objemov (Obr. 5.1). Riešenie zahŕňalo sústavu parciálnych diferenciálnych rovníc zachovania hmoty, hybnosti v troch smeroch, zachovania energie a dvoch rovníc na popis turbulencie podľa k-ε modelu.



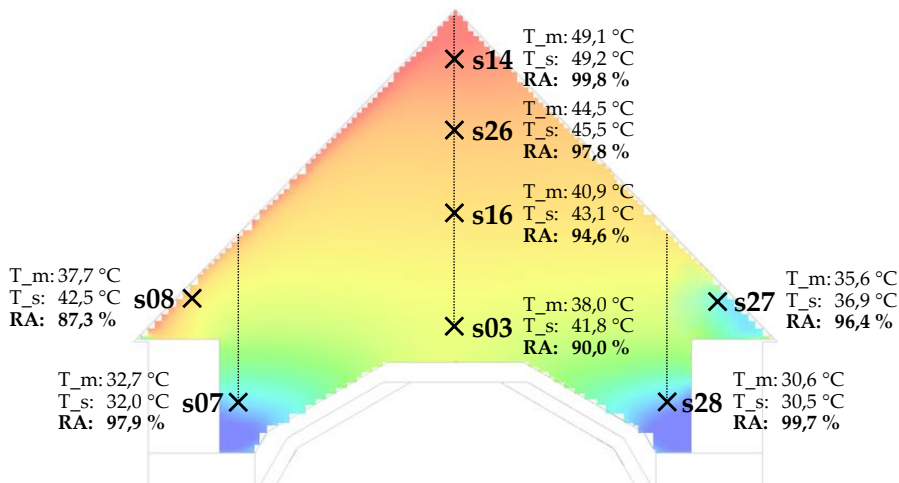
Obr. 5.1 - Simulačný model so štruktúrovanou sieťou a popisom vetracích otvorov

5.1.3 Vplyv vetrania pri rôznych vetracích režimoch

Záverom tejto časti bolo analyzovať vplyv konfigurácie vetracích otvorov na podmienky mikroklímy v podkrovných priestoroch. Pre tento účel tak boli vykonané dynamické simulácie v reálnom segmente podkrovného priestoru.

Simulačný model predstavoval trojmetrový výsek nad loďou kostola. Obvodové steny, nadmurvky a klenby boli tehlové. Zo strany podkrovia bola na klenbách umiestnená tepelná izolácia zo sklenej vlny. Strešná krytina bola z pozinkovaného plechu.

Model bol kalibrovaný pre stav z 10.7. o 13.00 h, kedy dosahovali teploty celoročné maximá. Validácia bola vykonaná porovnaním simulovaných a meraných teplôt (Obr. 5.2).



Obr. 5.2 - Rozloženie teploty vzduchu v segmente podkrovia 10.7. o 13.00 h

Po úspešnej validácii boli realizované celoročné dynamické simulácie štyroch odlišných alternatív prevetrávania segmentu podkrovného priestoru (Tab. 5.2). Pre tieto simulácie boli použité klimatické údaje z referenčného skúšobného roka pre lokalitu Ostrava. Ako ďalšia okrajová podmienka bola predpísaná teplota vzduchu pod klenbou.

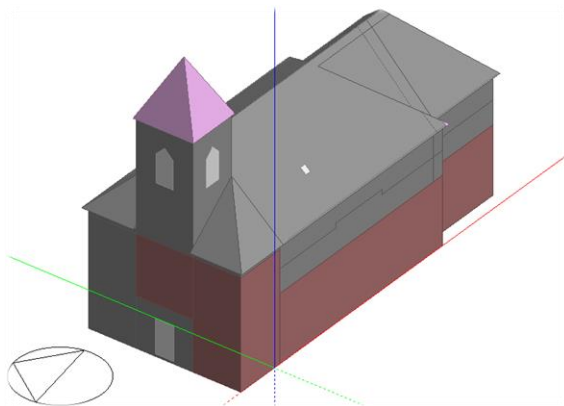
Tab. 5.2 - Alternatívy prevetrávania segmentu podkrovného priestoru

Alternatíva 1	Alternatíva 2	Alternatíva 3	Alternatíva 4
bez vetrania	s vetraním	s vetraním	s vetraním
–	D–strešný poklop	BH–odkvapová štrbina G–hrebeňová štrbina	D–strešný poklop BH–odkvapová štrbina G–hrebeňová štrbina

5.1.4 Vplyv vetrania pri rôznej vlhkostnej záťaži a vonkajšej klíme

Záverom tejto časti bolo analyzovať vplyv vetrania vchodovými dverami na podmienky mikroklimy v podkrovných priestoroch, uvažovaných vo viacerých lokalitách a vystavených rôznym úrovňam vlhkostného zaťaženia. Pre tento účel tak boli vykonané série celoročných dynamických simulácií v detailnom modeli reálneho podkrovného priestoru kostola.

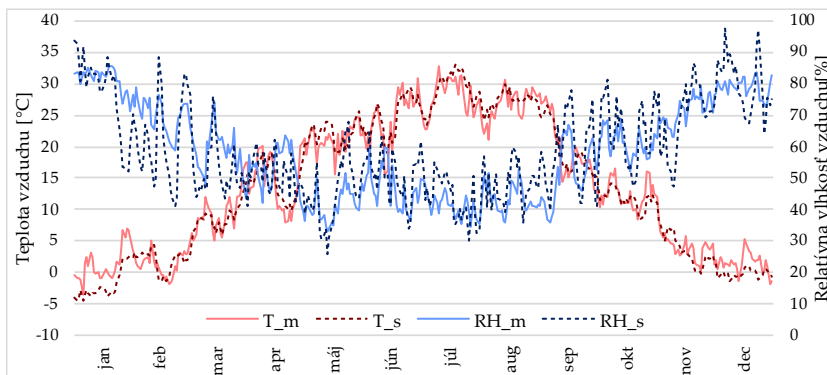
Simulačný model pozostával z niekoľkých zón (Obr. 5.3), ktoré boli navzájom prepojené. Obvodové steny, nadmurovky a klenby boli tehlové. Zo strany podkrovia bola na klenbách umiestnená tepelná izolácia zo sklenej vlny. Konštrukcia krovu bola zahrnutá do modelu ako akumulčná hmota. Strešná krytina bola z pozinkovaného plechu.



Obr. 5.3 - Detailný simulačný model vetrania podkrovného priestoru

Vetranie bolo zabezpečené kombináciou vetrania cez schodisko a vežu, netesnosťami plášťa a otvorom vo vrchole klenby. Na vystihnutie reálnej prevádzky boli definované rozvrhy obsadenosti, ktoré vychádzali zo skutočného užívania v rokoch 2024 a 2025.

Model bol kalibrovaný na základe nameranej teploty a relatívnej vlhkosti. Validácia modelu bola vykonaná porovnaním simulovaných a nameraných hodnôt (Obr. 5.4).



Obr. 5.4 - Porovnanie meraných a simulovaných veličín v podkrovnom priestore

Následne boli realizované celoročné simulácie dvoch scenárov vetrania (Tab. 5.3). Vetranie vchodovými dverami bolo uvažované ako pravidelné vetranie počas vybraných mesiacov (Tab. 5.4), bez ohľadu na vonkajšie podmienky. Vlhkostné zaťaženie priestoru bolo definované ako mesačný priemer relatívnej vlhkosti, zvýšený o 15 a 30 % oproti referenčnej relatívnej vlhkosti, s variabilitou $\pm 5\%$ v mesiaci. Simulácie boli vykonané pre klimatický rok Žilina-Bytčica a pre referenčné skúšobné roky z lokality Bratislava a lokality Ostrava. Ako okrajové podmienky boli predpísané aj teploty a relatívne vlhkosti vzduchu pod klenbou.

Tab. 5.3 – Scenáre vetrania a vlhkostného zaťaženia podkrovného priestoru

Scenár 1			Scenár 2		
bez vetrania vchodovými dverami			s vetraním vchodovými dverami		
RH ref.	RH +15 %	RH +30 %	RH ref.	RH +15 %	RH +30 %

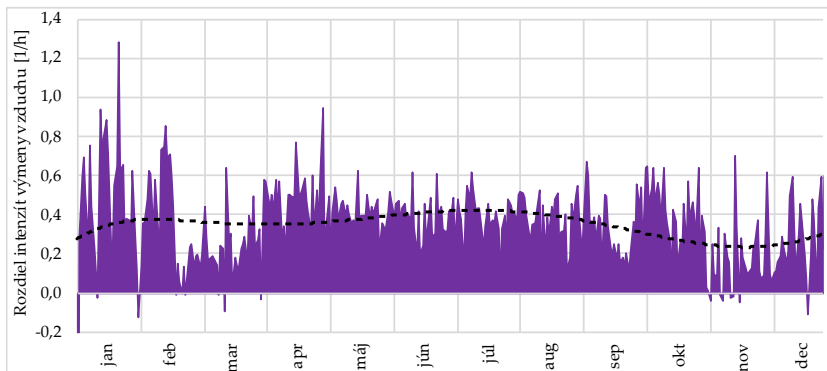
Tab. 5.4 – Rozvrhy vetrania cez vonkajšie vchodové dvere kostola

Mesiac		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Scenár 1	Pon–Pia	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Sob–Ned	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Scenár 2	Pon–Pia	X	X	9 – 17 h			9 – 19 h			9 – 17 h			X
	Sob–Ned	X	X	7 – 15 h			7 – 17 h			7 – 15 h			X

5.2 Vyhodnotenie a interpretácia výsledkov

5.2.1 Vplyv konštrukčných zmien

Použitie fólie najvýraznejšie prejavilo na intenzite výmeny vzduchu. Tá bola počas roka vyššia vo variante bez fólie, približne o 0,3 1/h, a rozdiel bol najvýraznejší v zime (Obr. 5.5).



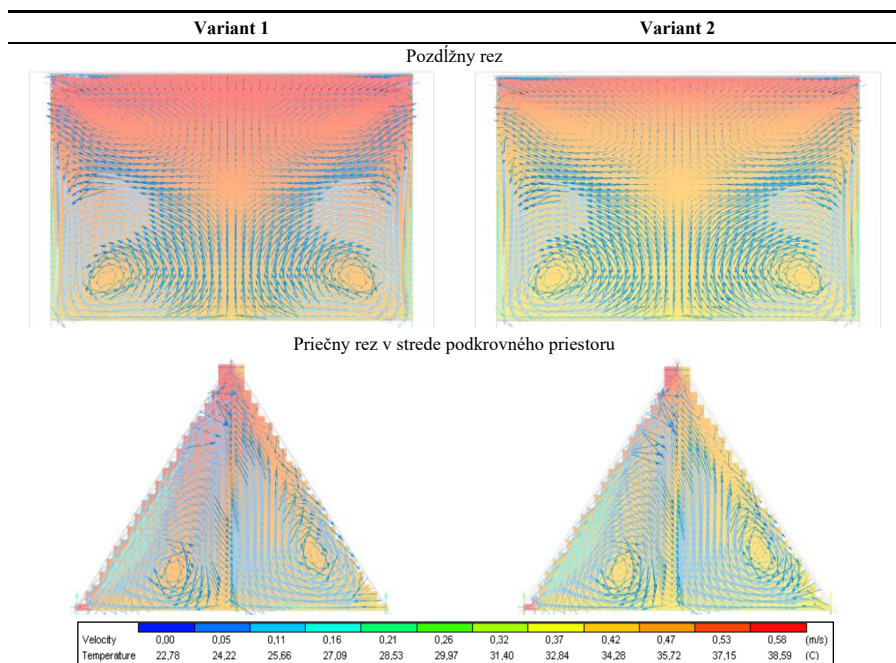
Obr. 5.5 – Rozdiel medzi variantami z hľadiska intenzity výmeny vzduchu v ročnom chode

V simulovaný augustový deň o 13.00 h bolo výrazné prúdenie v blízkosti masívnych stien a ohrievanej južnej roviny. Pri hrebení sa vytváral pretlak teplého vzduchu snažiaceho sa uniknúť cez hrebeňový otvor. Časť vzduchu však menila smer a začala obtekať chladnejšiu severnú rovinu. Vznikol tak vzdušný valec, ktorý popoludní homogenizoval teplotu (Tab. 5.5) (Tab. 5.6). O 19.00 h už bolo prúdenie vzduchu podporené vetrom (Tab. 5.7) (Tab. 5.8).

Tab. 5.5 - Charakteristiky vzduchu prúdiaceho cez vetracie otvory 5.8. o 13.00 h

Vetrací otvor	Plocha [m²]	Vstupný prietok [l/s]	Výstupný prietok [l/s]	Teplota vzduchu [°C]
Variant 1				
odkvapy	2,148	673,134	–	30,4
hrebeň	0,644	–	673,134	
Variant 2				
odkvapy	2,148	576,452	–	30,4
hrebeň	0,644	–	576,452	

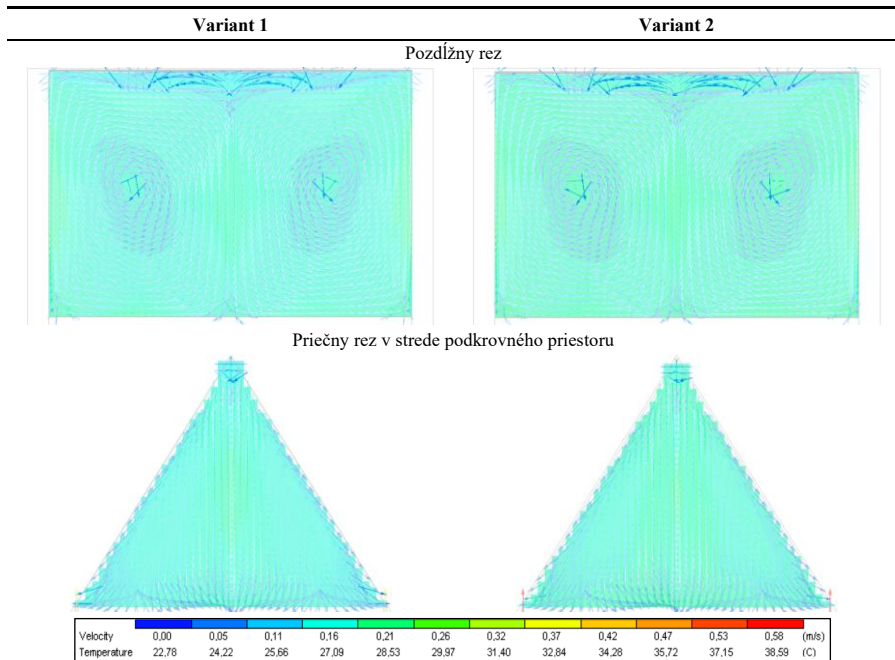
Tab. 5.6 - Trajektórie prúdenia vzduchu 5.8. o 13.00 h



Tab. 5.7 - Charakteristiky vzduchu prúdiaceho cez vetracie otvory 5.8. o 19.00 h

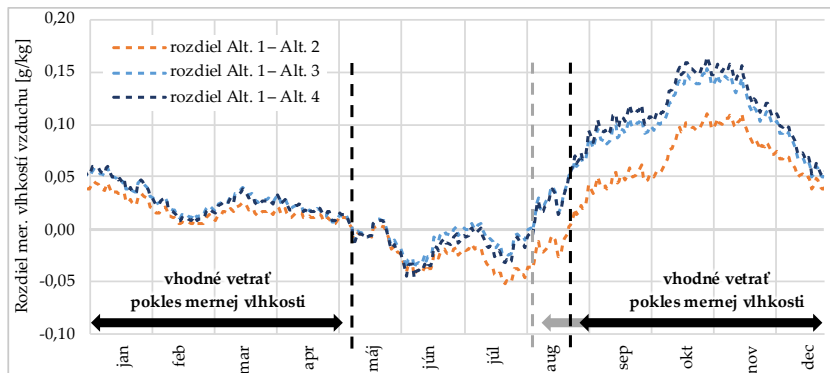
Vetrací otvor	Plocha [m²]	Vstupný prietok [l/s]	Výstupný prietok [l/s]	Teplota vzduchu [°C]
Variant 1				
odkvapy	2,148	1337,324	–	26,1
hrebeň	0,644	–	1337,324	
Variant 2				
odkvapy	2,148	1209,592	–	26,1
hrebeň	0,644	–	1209,592	

Tab. 5.8 - Trajektórie prúdenia vzduchu 5.8. o 19.00 h



5.2.2 Vplyv vetracích režimov

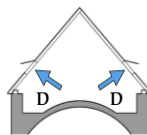
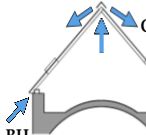
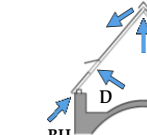
Rozdiely v mernej vlhkosti vzduchu boli minimálne počas jari, zatiaľ čo v lete bola merná vlhkosť vzduchu vyššia vo vetraných podkroviach. Naopak, na jeseň a v zime boli v týchto podkroviach merné vlhkosti vzduchu nižšie (Obr. 5.6). Preukázalo sa tiež, že vetranie cez otvory pri odkvapoch a v hrebeni je účinnejšie než vetranie cez poklapy.



Obr. 5.6 - Rozdiel medzi alternatívami z hľadiska mernej vlhkosti vzduchu v ročnom chode

Postupný pokles rovnovážneho obsahu vlhkosti dreva počas jari a leta poukázal na sušiacie charakteristiky vzduchu v týchto obdobiach. Výsledky naznačili, že najmä počas prechodných období roka môže prirodzené vetranie znižovať obsah vlhkosti až o 0,9 % (Tab. 5.9).

Tab. 5.9 - Pozitívny dopad prevetrávania na rovnovážnu vlhkosť dreva v prechodných obdobiach roka

Alternatíva 1	Alternatíva 2	Alternatíva 3	Alternatíva 4
			
EMC = 15,4 %	EMC = 14,7 %	EMC = 14,8 %	EMC = 14,5 %

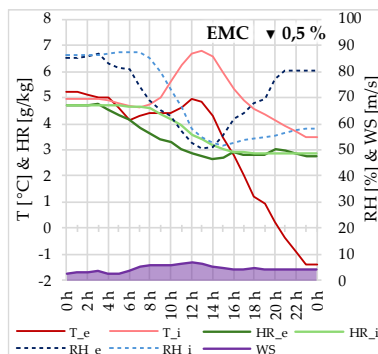
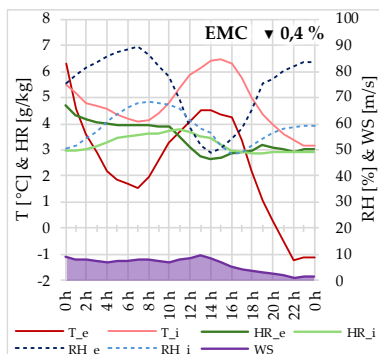
5.2.3 Vplyv vlhkovostnej záťaže a vonkajšej klímy

Podkrovné priestory v lokalite Žilina-Bytčica sa javili pri základnom vlhkovstom zaťažení podkrovia najsuchšie. Pravidelné otváranie vchodových dverí pri základnej vlhkovstnej záťaži zvýšilo rovnovážny obsah vlhkosti dreva maximálne o 0,7 %. Naopak, pri vyššej úrovni vlhkovstného zaťaženia sa prejavil pozitívny účinok vetrania s poklesom vlhkosti dreva až o 0,9 %. Tiež bolo možné odsledovať, že jarne a letné vetranie má potenciál prispieť k sušeniu, zatiaľ čo jesenné vetranie sa javí silne závislé od vlhkovstného zaťaženia (Tab. 5.10).

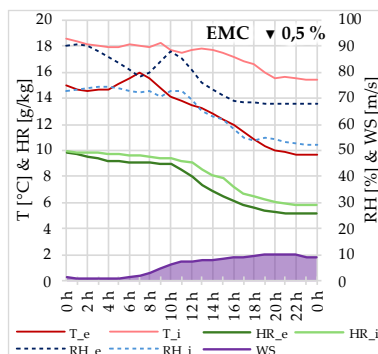
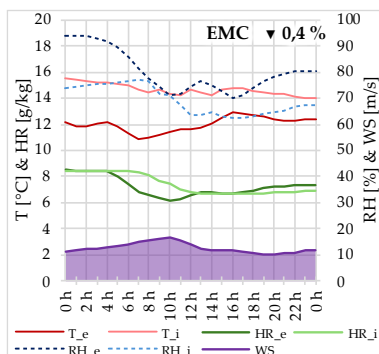
Výsledky simulácií podporujú hypotézu, že účinnosť vetrania podkrovných priestorov závisí najmä od správneho načasovania s ohľadom na aktuálne klimatické podmienky. Ďalšia časť analýzy sa preto zamerala na identifikáciu dní s teoreticky najvyšším denným poklesom rovnovážneho obsahu vlhkosti dreva 0,4 až 0,5 % (Obr. 5.7) (Obr. 5.8).

Tab. 5.10 - Dopad scenárov vetrania a vlhkovstného zaťaženia na mesačné priemery rovnovážnej vlhkosti dreva

Mesiac		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
EMC [%]	Žilina-Bytča	RH ref.	Z 16,3	12,2	10,4	9,6	8,5	9,3	8,1	8,7	10,8	12,4	13,7	17,1
		O	–	–	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2	+0,3	+0,4	–
		RH +15	Z 23,3	16,8	15,6	13,8	11,6	11,3	9,4	10,3	14,1	18,1	19,7	25,6
		O	–	–							-0,1	-0,2	-0,4	–
		RH +30	Z 28,2	21,9	19,2	16,9	13,1	12,2	9,6	10,7	16,4	22,4	25,2	28,4
		O	–	–	-0,2	-0,5	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,4	-0,6	-0,7	–
	Bratislava	RH ref.	Z 16,4	9,4	10,2	8,8	9,1	10,0	8,1	9,2	11,5	12,1	13,9	15,1
		O	–	–	+0,1		+0,1	+0,1	+0,1		+0,1	+0,2	+0,7	–
		RH +15	Z 21,6	14,4	14,4	12,6	12,1	12,7	9,8	11,0	15,3	16,9	18,3	20,8
		O	–	–		-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	–
		RH +30	Z 28,3	18,1	18,4	15,8	14,3	14,0	10,3	11,7	18,6	22,3	25,7	27,1
		O	–	–	-0,3	-0,1	-0,3	-0,2	-0,1	-0,2	-0,4	-0,9	-0,7	–
	Ostrava	RH ref.	Z 14,3	13,8	11,2	10,5	9,7	9,9	10,6	9,1	10,7	11,7	14,8	16,1
		O	–	–	+0,1			+0,1	+0,1		+0,1	+0,1	+0,4	–
		RH +15	Z 19,0	19,7	15,8	14,2	15,3	13,0	13,4	11,5	14,8	16,0	18,6	22,8
		O	–	–	-0,1		-0,2	-0,2	-0,1	-0,1		-0,1	-0,1	–
		RH +30	Z 27,7	28,8	20,9	18,5	16,4	15,3	14,7	13,0	19,7	21,5	26,4	28,8
		O	–	–	-0,1	-0,3	-0,3	-0,5	-0,1	-0,3	-0,2	-0,5	-0,8	–



Obr. 5.7 - Trendy vybraných klimatických údajov v reprezentatívne slnečné dni s výrazným sušiacim potenciálom



Obr. 5.8 - Trendy vybraných klimatických údajov v reprezentatívne zamračené dni s výrazným sušiacim potenciálom

5.3 Čiastkový záver

Spracované dynamické simulácie vetrania umožnili podrobne analyzovať vplyv rôznych alternatív vetrania a konštrukčných zmien na vnútornú klímu podkrovných priestorov.

Výsledky ukázali, že aplikácia difúznej fólie ovplyvňuje tepelno-vlhkostné podmienky, intenzitu výmeny vzduchu i samotné prúdenie vzduchu. Celkový objem prúdiaceho vzduchu počas horúcich letných dní totiž poklesol o 10 až 15 %.

Analýza spôsobov prevetrávania potvrdila, že prevetrávané podkrovia vykazujú mimo leta nižšiu mernú vlhkosť vzduchu. Rozdiel vo vlhkosti dreva zároveň dosahoval až 0,9 %. Z hľadiska účinnosti bolo vetranie otvormi pri odkvapoch a hrebeni strechy najúčinnnejšie.

Parametrická simulácia scenárov vetrania pri rôznych úrovniach vlhkového zaťaženia poukázala na rozdiely medzi klimatickými rokmi z rôznych lokalít a období. Pravidelné sezónne vetranie vchodovými dverami sa ukázalo účinným len pri vysokej vlhkovostnej záťaži, no v bežných podmienkach bol jeho účinok skôr negatívny. Z dosiahnutých výsledkov vyplynulo, že efektívnosť vetrania závisí predovšetkým od správneho načasovania.

Identifikácia dní s najvyšším potenciálom sušenia a ich analýza preukázala, že účinnosť vetrania nerastie len keď je vonkajší vzduch suchší, ale keď je podporený energiou vetra.

Záverom možno konštatovať, že počítačové simulácie predstavujú dôležitý nástroj pre návrh efektívneho a citlivého systému vetrania. Spolu s experimentálnym monitorovaním tvoria komplexnú bázu pre formulovanie odporúčaní, ktoré sú fyzikálne opodstatnené, prevádzkovo a technicky realizovateľné a rešpektujú historické hodnoty.

6 ZÁVER

Predložená dizertačná práca sa cielene zamerala na teoreticko-experimentálnu analýzu vplyvu vetrania na vnútornú klímu podkrovných priestorov sakrálnych stavieb v miernom klimatickom pásme, a to prostredníctvom monitorovania mikroklimatických podmienok a dynamických simulácií vetrania podkrovných priestorov.

Teoretická časť práce zahŕňala detailný prehľad súčasného stavu poznatkov, pojednávala o realizovaných výskumoch, rekapitulovala mechanizmy šírenia tepla, prenosu vlhkosti a prúdenia vzduchu v kontexte sušenia dreva a približovala princípy a veličiny, ktoré možno využívať pri hodnotení účinnosti vetrania podkrovných priestorov.

Praktická časť práce pozostávala z dvoch častí, konkrétne z viac než trinásťmesačného monitorovania mikroklimy a dynamických simulácií vetrania podkrovných priestorov.

6.1 Závery a význam pre vednú disciplínu

- Výsledky in situ monitorovania preukázali výrazné vertikálne a priestorové rozdiely v rozložení teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu. V lete boli v blízkosti hrebeňa zaznamenané teploty nad 60 °C a relatívne vlhkosti pod 10 %, zatiaľ čo v zime boli v blízkosti severného odkvapu relatívne vlhkosti často nad 80 %.
- Na základe sorpčných modelov bol vypočítaný rovnovážny obsah vlhkosti dreva. Ten začal výrazne klesať na jar, v lete vychádzal pri hrebeni strechy pod 8 %, počas jesene narastal a v zime dosahoval pri severnom odkvape nad 21 %. Vyššie vlhkosti boli typické aj pre obmedzene vetrané priestory. Rozdiely medzi matematickými modelmi dosahovali až 2 % a ako najstabilnejší sa javil Hailwood-Horrobinov model.
- Najprínosnejšie pre sušenie dreva v podkrovných priestoroch sa javilo vetranie na prelome zimy a jari. Pri zvýšenej vlhkostnej záťaži by bolo vetranie priaznivé aj po celý rok. V dobre vetranom podkroví zas zvyšovanie intenzity nebolo potrebné.
- Aplikácia difúznej fólie mala významný vplyv na intenzitu výmeny vzduchu a samotné prúdenie vzduchu. Pri použití fólie totiž klesla intenzita výmeny vzduchu a celkový objem vzduchu poklesol o 10 až 15 %. Výstupy zo CFD simulácií ilustrovali vznik vzdušného valca, ktorý popoludní homogenizoval teplotu.
- Dynamika vývoja mernej vlhkosti vzduchu sa líšila podľa ročného obdobia. Mimo leta bola merná vlhkosť vzduchu nižšia vo vetraných podkroviach. Vetrané podkrovia vykazovali v prechodných obdobiach rovnovážny obsah vlhkosti dreva nižší o 0,9 %.
- Parametrická simulácia poukázala na to, že pravidelné sezónne vetranie vchodovými dverami bolo efektívnym len pri vysokej vlhkostnej záťaži, kedy pokles vlhkosti dreva predstavoval až 0,9 %. Na druhej strane, pri základnej vlhkostnej záťaži viedlo takého vetranie k nárastu vlhkosti dreva o 0,7 %. Z identifikácie reprezentatívnych dní s najvýraznejším potenciálom sušenia zase vyplynulo, že efektívnosť vetrania nerástla iba ak bol vzduch vo vonkajšom prostredí suchší, ale keď bol podporený vetrom.

6.2 Závery a význam pre inžiniersku prax

- Inovatívna metodika monitorovania integrovala kalibrovaný bezdrôtový merací systém, krátkodobé merania vlhkomerom a anemometrom, sledovanie priestorových pohybov vzduchu a povrchových teplotných polí. Tento prístup tak môže poslúžiť ako podklad pre budúce revízie technických noriem.
- Špecifiká podkroví vyplývali z komplexnej interakcie klimatických, prevádzkových a stavebno-konštrukčných faktorov. Napriek tomu sú niektoré zistenia aplikovateľné naprieč podkrovmi sakrálnych budov v miernom klimatickom pásme.
- Vetranie malo síce potenciál, zvyšujúci sa s rastúcou vlhkosťou záťažou, ale nebolo prospešné univerzálne. Preto je vhodnou stratégiou inteligentné vetranie. Vetranie otvormi pri odkvapoch a v hrebeni je účinnejšie než vetracími poklopmi, no vetranie cez poklopy môže byť vhodné pri krátkodobom vetraní podkrovia po slávnostiach.
- Aplikácia poistných difúzných fólií či uzatváranie vetracích otvorov vplývali na intenzitu výmeny vzduchu a tepelno-vlhkostné podmienky. Pred ich realizáciou je tak nutné zväziť ich dlhodobý dopad na vlhkosť drevených prvkov.
- Vypočítané rovnovážne obsahy vlhkosti dreva ilustrovali teoretické rozloženie vlhkosti dreva. Riziko biologického ataku však lepšie vystihujú povrchové vlhkosti a preto je žiaduce vyvinúť model, ktorý by na umožniť odhad povrchovej vlhkosti.
- Dynamické simulácie umožnili vytvoriť virtuálne dvojča podkrovného priestoru a bez rizika testovať viaceré vetracie stratégie. Zostavený klimatický súbor nájde využitie pri ďalších simulačných analýzach, no očakávania sa kladú hlavne na softvér, ktorý presnejšie odhadoval relatívnu vlhkosť vzduchu.

Zistenia dizertačnej práce poskytujú pracovníkom pamiatkových úradov odborný rámec a argumentačnú oporu pri rokovaniach s vlastníkami historických budov. Pre správcov zas môžu byť prínosné grafy, ktoré umožňujú posúdiť vhodnosť vetrania na základe známej teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v podkrovnom priestore a vo vonkajšom prostredí.

VÝBER BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] Vinař J, Kyncl J. *Historické krovky: Typologie, průzkum, opravy*. Grada, 2022.
- [2] Korenková R. *Ochrana a obnova historických krovov*. Habilitačná práca, Slovenská technická univerzita, 2014.
- [3] Suchý Ľ, Zacharová D. *Metodika identifikácie a výskumu historických krovov*. Pamiatkový úrad Slovenskej republiky, 2018.
- [4] Vlček M, Moudrý I, Novotný M, a kol. *Poruchy a rekonstrukce staveb*. ERA, 2001.
- [5] Martín JA, López R. Biological Deterioration and Natural Durability of Wood in Europe. *Forests*, 2023.
- [6] Vereecken E, Roels S. Review of Mould Prediction Models and their Influence on Mould Risk Evaluation. *Building and Environment*, 2012.
- [7] Ingebretsen SB, Andenæs E, Gullbrekken L, a kol. Microclimate and Mould Growth Potential of Air Cavities in Ventilated Wooden Facade and Roof Systems-Case Studies from Norway. *Buildings*, 2022.
- [8] Reinprecht L. *Ochrana dreva*. Technická univerzita vo Zvolene, 2012.
- [9] Dietsch P, Franke S, Franke B, a kol. Methods to Determine Wood Moisture Content and their Applicability in Monitoring Concepts. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2015.

- [10] Korenková R, Krušínský P. The Analysis of Moisture Regime of the Under-Roof Space in a Historical Truss. *Theoretical Foundation of Civil Engineering: Russian - Slovak - Polish Seminar*, 2012.
- [11] Herrera A, Gálvez AM. Evaluation of Vulnerability to Heavy Precipitation of the Roofs of Historic Chilean Buildings with Wooden Structure. A Methodology to Apply at an Early Stage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020.
- [12] Kherais M, Csebfalvi A, Len A. Moisture Content Changing of a Historic Roof Structure in Terms of Climate Effects. *Pollack Periodica*, 2022.
- [13] Richter J, Staněk K, Tywoniak J, a kol. Moisture-Safe Cold Attics in Humid Climates of Europe and North America. *Energies*, 2020.
- [14] Serafini A, Gonzalez Longo C. Seventeenth and Eighteenth Century Timber Roof Structures in Scotland: Design, Pathologies and Conservation. *Structural Analysis of Historical Constructions: Anamnesis, Diagnosis, Therapy, Controls*. CRC Press, 2016.
- [15] Jensen NF, Bjarløv SP, Johnston CJ, a kol. Hygrothermal Assessment of North-Facing, Cold Attic Spaces Under the Eaves with Varying Structural Roof Scenarios. *Journal of Building Physics*, 2020.
- [16] Dietsch P, Gamper A, Merk M, a kol. Monitoring Building Climate and Timber Moisture Gradient in Large-Span Timber Structures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2015.
- [17] Tsilingiris PT. Thermal Flywheel Effects on the Time Varying Conduction Heat Transfer Through Structural Walls. *Energy and Buildings*, 2003.
- [18] Sibilla L, Vlček M, Struhala K, a kol. Evaluation of the Dependence of the Parameters of Internal Environment of Wooden Truss on the Orientation of the Building. *Applied Mechanics and Materials*, 2016.
- [19] Stevens B, Feingold G. Untangling Aerosol Effects on Clouds and Precipitation in a Buffered System. *Nature*, 2009.
- [20] Sabbioni C. *The Atlas of Climate Change Impact on European Cultural Heritage: Scientific Analysis and Management Strategies*. Noah'S Ark. Anthem Press, 2010.
- [21] Bertolin C, Camuffo D, Leissner J, a kol. Results of the EU Project Climate for Culture: Future Climate-Induced Risks to Historic Buildings and their Interiors. *SISC Conference*, 2014.
- [22] Teischinger A, Avramidis S, Hansmann C, a kol. Sawn Timber Steaming and Drying. *Springer Handbook of Wood Science and Technology*, 2023.
- [23] Taylor FW, Mitchell PH. Drying Pine Lumber at Very High Temperatures and Air Velocities. *Wood and Fiber Science*, 1985.
- [24] Šafařík P, Vestfálová M. *Termodynamika vlhkého vzduchu*. České vysoké učení technické v Praze, 2016.
- [25] Glass SL, Zelinka SL. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Forest Products Laboratory, 2010.
- [26] Anderson NT, McCarthy JL. Two-Parameter Isotherm Equation for Fiber-Water Systems. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1963.
- [27] Hailwood AJ, Horrobin S. Absorption of Water by Polymers: Analysis in Terms of a Simple Model. *Transactions of The Faraday Society*, 1946.
- [28] Henderson SM. A Basic Concept of Equilibrium Moisture. *Agricultural Engineering*, 1952.
- [29] Pamiatkový úrad Slovenskej republiky. Dostupné online: <https://www.pamiatky.sk/> (cit. 5. 5. 2025).

PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA

Poljak M, Ponechal R. Microclimatic Monitoring - The Beginning of Saving Historical Sacral Buildings in Europe. *Energies*, 2023. Vol. 16, no. 3, p. 1156. <https://doi.org/10.3390/en16031156>

Poljak M, Ponechal R, Krušínský P. Influence of Membrane on Airflow in Historical Attic Spaces: The First Principles Study Using CFD Models. *Juniorstav 2024: Proceedings of the 26th International Scientific Conference of Civil Engineering*, 2024. Vol. 1, pp. 1-10. <https://doi.org/10.13164/juniorstav.2024.24054>

Poljak M, Ponechal R. Priestorové rozloženie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu v podkroví historického kostola počas leta. *Stretnutie ústavov a katedier pozemných stavieb SR a ČR. Pozemné stavby v kontexte súčasných celospoločenských výziev: Zborník z vedeckej konferencie*, 2024. Vol. 1, pp. 50-54.

Poljak M, Ponechal R. Optimisation of Attic Space Ventilation in a Listed Church: Integration of Microclimatic Monitoring and Dynamic Simulations. *Protection of Historical Constructions. PROHITECH 2025. Lecture Notes in Civil Engineering*, 2025. Vol. 595, pp. 470-477. https://doi.org/10.1007/978-3-031-87312-6_58

Poljak M, Ponechal R. Monitoring tepelno-vlhkostnej mikroklimy v podkrovnom priestore kostola. *Zborník odborných referátov z 23. medzinárodnej konferencie TEPELNÁ OCHRANA BUDOV 2025*, 2025. Vol. 1, pp. 90-55.

V tlači:

Poljak M. Temperature and Relative Humidity Distribution in a Heritage Church Attic During Summer. *TRANSCOM 2025: 16th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport*, 2025.

Kysela P, Poljak M. Development Of Meteorological Radiation Shields Using 3D Printing. *CESB25: Central Europe towards Sustainable Building, 7th International Scientific Conference*, 2025.

Ponechal R, Poljak M., Miháľková N. An Effect of Air Velocity on Timber Truss Element Surface Moisture Content. *CECEM 2025: Central Europe Civil Engineering Meeting*, 2025.