



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Stavebná fakulta

Meno a priezvisko:

Ing. Silvia Martinkovičová

Autoreferát dizertačnej práce

Vybrané problémy modelovania historických krovov

na získanie akademického titulu philosophiae doctor – PhD.

na získanie akademického titulu:

philosophiae doctor – PhD.

v doktorandskom študijnom programe:

teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

v študijnom odbore:

stavebníctvo

Forma štúdia:

denná

Miesto a dátum: Bratislava, jún 2025



Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Katedre kovových a drevených konštrukcií, Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Predkladateľ:

Ing. Silvia Martinkovičová

Katedra kovových a drevených konštrukcií

Stavebná fakulta STU v Bratislave

Radlinského 11

810 05 Bratislava

Školiteľ:

Prof. Ing. Jaroslav Sandanus, PhD.

Katedra kovových a drevených konštrukcií

Stavebná fakulta STU v Bratislave

Radlinského 11

810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa: 12.6.2025

**Obhajoba dizertačnej práce sa koná o hod.
na Katedre kovových a drevených konštrukcií, Stavebnej fakulty STU v Bratislave.**

.....
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.

dekan Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Obsah autoreferátu

1.	ÚVOD	1
1.1.	Cieľ dizertačnej práce	1
1.2.	Tézy dizertačnej práce.....	1
2.	TEORETICKÁ ČASŤ	2
2.1.	Úvod do problematiky – história krovov	2
2.3.	Sumarizácia riešených konštrukčných systémov	4
3.	APLIKÁCIA POZNATKOV	5
3.1.	Statické katalógové listy	5
3.2.	Analytická tabuľka konštrukcií	6
4.	EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	7
4.1.	Koncept experimentu	7
4.2.	Experimentálny model	8
4.3.	Rozmery a popis experimentálneho modelu	8
4.4.	Popis merania experimentálneho modelu	9
4.4.1.	<i>Optické – Fotogrametrické meranie</i>	10
4.4.2.	<i>Meranie pomocou indukčných meračov deformácií</i>	10
4.5.	Celkové zhodnotenie experimentálneho merania modelu trojväzbového krovu	11
4.6.	Určenie materiálových charakteristík odobratých vzoriek	12
5.	VÝPOČTOVÁ ČASŤ	13
5.1.	Numerická analýza – popis modelu	13
5.2.	Kalibrácia numerického modelu - zaťažovanie	13
5.3.	Postupné narezávanie konštrukcie – tuhosť pružného kĺbu	14
5.4.	Postupné narezávanie konštrukcie – analýza stavu vnútornej napätosti konštrukcie	15
5.5.	Vyhodnotenie numerického modelovania experimentálneho modelu	15
6.	ZÁVER	16
6.1.	Možnosti využitia statických katalógových listov pre prax	16
6.2.	Odborný a praktický prínos výsledkov pre inžiniersku prax	17
6.3.	Ďalší možný postup v problematike a odporúčanie pre ďalší výskum	17
	Zoznam použitej literatúry	18
	Zoznam publikácií autora.....	18

1. ÚVOD

Poznanie statického modelu krovu je zásadné pre správnu diagnostiku a obnovu historických striech, ako aj pre rozvoj súčasného tesárstva. Tesárstvo má dlhú tradíciu práce s drevom a vytvárania rôznych konštrukcií, z ktorých krovy zohrávajú kľúčovú úlohu v ochrane a stabilite historických budov.

S rozvojom moderných technológií sa pôvodné poznatky o historických krovoch vytrácali. Dnes je preto dôležité rozumieť ich statickému správaniu, ktoré poskytuje cenné informácie pre ich zachovanie. Historické krovy, najmä z 14. až 19. storočia, sú dôkazom technickej kreativity a vývoja od jednoduchých po zložité priestorové systémy.

Tieto konštrukcie však podliehajú degradácii vplyvom času, vlhkosti, škodcov či neodbornej údržby a zásahom. Častými poruchami sú odhnutie prvkov, nevhodné opravy a zásahy, ktoré narúšajú statické pôsobenie krovu. Ich dôsledná analýza je nevyhnutná pre zachovanie historických objektov.

1.1. Cieľ dizertačnej práce

Cieľom práce bolo analyzovať a systematicky zhrnúť typologické a konštrukčné princípy historických krovových systémov v priebehu jednotlivých historických období.

Práca sa venuje modelovaniu statického pôsobenia krovu pri poškodení priečnej väzby. Predmetom skúmania bol vplyv latovania na celkovú tuhosť konštrukcie a prenos vnútorných síl do susedných väzieb.

Súčasťou riešenia práce bolo vytvorenie experimentálneho modelu, ktorý umožnil vizualizáciu a zaznamenanie reakcie konštrukcie pri rôznych úrovniach poškodenia priečnej väzby.

Na základe experimentálnych výsledkov je následne vytvorený a nakalibrovaný numerický model prezentujúci statické správanie fyzikálneho modelu krovu. Kalibrácia modelu umožnila overiť presnosť výpočtových predpokladov a kvantifikovať účinok latovania pri poruche priečnej väzby.

1.2. Tézy dizertačnej práce

V písomnej práci k dizertačnej skúške, ktorá sa uskutočnila dňa 29. 6. 2023, boli formulované nasledovné tézy dizertačnej práce:

1. Kompletizácia historického prehľadu nosných konštrukcií krovových systémov a používaných prvkov krovov (pomenovanie, použitie).
2. Spracovanie statického prehľadu typizovaných historických konštrukčných systémov krovov.
 - a. Stanovenie najvhodnejšieho spôsobu typizovania krov
 - b. Výhodnosť použitia daného konštrukčného riešenia
 - c. Účinky vnútorných síl na typizovaných konštrukciách
 - d. Deformovateľnosť (tuhosti) konštrukčného riešenia
 - e. Zložitosť (množstvo prvkov) konštrukčného riešenia
3. Analýza problematiky najčastejších porúch historických konštrukcií krovov, modelovanie porúch, roznos zaťaženia vplyvom poruchy. Hlavné zameranie na odhnutie prvku krovu.
4. Porovnanie vplyvu latovania pri roznose zaťaženia v rámci typizovaných historických konštrukčných systémov krovov. Vplyv na celkovú tuhosť konštrukčného systému krovu.
5. Rozbor vplyvu latovania pri porušení priečnej väzby konštrukcie.
 - a. Numerické modelovanie
 - b. Experimentálny model

2. TEORETICKÁ ČASŤ

2.1. Úvod do problematiky – história krovov

Pojem historické krovky predstavujú tradičné drevené strešné konštrukcie, ktoré sa vyskytovali prevažne do konca druhej polovice 19. storočia. Za vrcholné obdobie vývoja tesárstva v oblasti krovových konštrukcií možno považovať prelom 19. a 20. storočia, kedy sa objavili aj technicky náročné riešenia, ako drevené klenuté strechy. Drevené konštrukcie striech majú svoje korene už v antickom Ríme, pričom ich výroba bola založená na ručnom opracovaní dreva, prevažne pomocou sekier a ďalších tradičných nástrojov. Krov ako nosný prvok strešného plášťa tvorí neoddeliteľnú súčasť takmer každej stavby. Najčastejším materiálom na zhotovenie nosných prvkov bolo mäkké drevo z ihličnatých stromov, ako sú smrek, borovica a jedľa, ktoré sa vyznačuje priaznivými mechanickými vlastnosťami a jednoduchším opracovaním. Tvrdé listnaté dreviny sa pri nosných prvkoch nepoužívali, ale našli uplatnenie

najmä pri výrobe spojovacích čapov a kolíkov. V počiatočných fázach sa na stavbu používala prevažne guľatina, ktorá bola neskôr nahradená štandardizovanými hranolmi rôznych rozmerov. Drevo bolo pred spracovaním ponechávané na prirodzené vysušenie, čím sa znižovalo riziko jeho neskoršej deformácie. Vzhľadom na svoju organickú podstatu však boli drevené krovy náchylné na poškodenie biologickými činiteľmi – hnilobou, drevokazným hmyzom – a ich najväčším historickým rizikom bol požiar, ktorý často zničil celé strešné konštrukcie aj s objektmi. K postupným zmenám krovov dochádzalo najmä pri výmene strešnej krytiny alebo pri zmene tvaru strechy, ktorá bola vždy úzko spätá s dobovými architektonickými trendmi. Pri obnove historických krovov, ktoré sú súčasťou pamiatkovo chránených objektov, je nevyhnutné postupovať citlivo, so zreteľom na zachovanie ich autentickej hodnoty. Tradičné tesárske techniky, nástroje a technologické princípy, ktoré sa formovali už v stredoveku, pretrvali do dnešných čias a tvoria základ aj pre moderné zásahy do historických konštrukcií..

2.2. Typologicko - konštrukčný a statický vývin historických krovov

Historické krovy predstavujú nielen dôležitú súčasť architektonického dedičstva, ale aj významný nosný systém budov, ktorého konštrukčné riešenie sa v priebehu dejín neustále vyvíjalo. Táto kapitola sa venuje práve typologickému a statickému vývoju krovových konštrukcií, pričom kladie dôraz na pochopenie základných statických princípov, ktoré viedli návrh a výstavbu v jednotlivých historických obdobiach. Poznanie statického modelu krovu – teda toho, ako a ktoré prvky prenášali vnútorné sily – je kľúčové nielen pre statika, ale aj pre iné profesie, ako sú tesári, konštruktéri či reštaurátori. V každom období sa konštruktéri zameriavali na iné priority – raz to bola jednoduchosť výroby, inokedy úspora materiálu alebo schopnosť preklenúť väčšie rozpätia. Kapitola preto prináša základný prehľad hlavných typov historických krovov, ich vývojových línií a statických schém, ktoré vysvetľujú princíp fungovania jednotlivých systémov. Nechýbajú ani základné informácie o pôsobení zaťaženia a ich prenose do nosnej konštrukcie budovy. Cieľom je vytvoriť všeobecný rámec, ktorý poslúži ako úvod do problematiky a pomôže lepšie pochopiť, prečo boli krovy navrhnuté práve tak, ako boli. Táto kapitola neslúži ako podrobná statická analýza, ale ako orientačný materiál, ktorý má poskytnúť základné vedomosti.

2.3. Sumarizácia riešených konštrukčných systémov

Sumarizované konštrukčné systémy historických krovov poskytujú ucelený prehľad o typologickom aj statickom vývoji týchto dôležitých nosných prvkov architektúry. Celkovo bolo vytvorených trinásť typických statických modelov konštrukcií, ktoré slúžia ako prehľadný nástroj pre orientáciu v historickom vývoji krovových konštrukcií. Do výberu boli zahrnuté jednoduché krokrové sústavy zo 14. storočia, ktoré reprezentujú rané formy zastrešenia. Ďalej boli analyzované zložitejšie systémy z 18. storočia, medzi nimi ležatá stolica s päťbokým prahom, ako aj jej modifikácia s vešiakom. Osobitné miesto patrí manzardovej ležatej stolici s päťbokým prahom podľa návrhu Johann J. Shüblera, ktorá je príkladom technickej vyspelosti krovových systémov určených pre obytné účely. Statický vývoj je ukončený konštrukciami z prelomu 18. a 19. storočia, ktoré vychádzajú z rôznych variantov Rankovho úsporného krovu, známeho svojou materiálovou efektívnosťou. Na *obrázku 2.3.1* je uvedená prehľadná tabuľka zoznamu analyzovaných konštrukcií.

Zoznam konštrukcií			
Označenie konštrukcie	2D schéma	Označenie konštrukcie	2D schéma
01 Krovový krov s hambáľkami a šikmými päťnými vzperami krokiev, bez pozdĺžneho zavetrenia		02 Vážnicový krov s hrebeňovou stolicou, bez pomúrnic, s okapovými väznicami a s vyvesením väzných trávov	
03 Krovový krov s dvoma hambáľkami, zvislými päťnými vzperami krokiev a s podkrovovými vzperami		04 Krovový krov s dvoma hambáľkami, zvislými päťnými vzperami krokiev a s podkrovovými vzperami	
05 Ležatá stolica s päťbokým prahom podľa Johann Jacob Schübler		06 Krovový krov s vešiakom a s ležatou stolicou do päťbokého prahu Johann Jacob Schübler	
07 Manzardová ležatá stolica s päťbokým prahom podľa Johann Jacob Schübler		08 Rankov úsporný krov variant A	
09 Rankov úsporný krov variant B		010 Rankov úsporný krov - derivát	
011 Vážnicový krov s vyvesenými šikmými stĺpkami		012 Vážnicový krov s dvojistou stojatou stolicou s vyvesením väzných trávov	
013 Vážnicový krov s ležatou stolicou			

Obrázok 2.3.1 Zoznam konštrukcií

3. APLIKÁCIA POZNATKOV

Táto kapitola sa venuje uplatneniu získaných poznatkov pri tvorbe statického katalógu historických krovových systémov.

3.1. Statické katalógové listy

Z dôvodu rozsahu a veľkosti jednotlivých katalógových listov, ako aj prehľadnosti samotnej kapitoly, je v texte hlavnej časti prezentovaná iba jedna konštrukcia ako vzorový príklad. Kompletný súbor katalógových listov pre všetky analyzované konštrukčné systémy, vrátane výpočtov, schém a výstupov, je uvedený v práci. Táto kapitola má teda orientačný a ilustračný charakter, s cieľom oboznámiť s obsahovou štruktúrou a rozsahom každého katalógového listu. Katalóg bol vypracovaný v programe Microsoft Excel s cieľom vytvoriť prehľadný a flexibilný systém na evidenciu údajov o konštrukciách. Zvolený formát tabuliek umožňuje nielen systematické usporiadanie dostupných informácií, ale aj ich priebežné rozširovanie, aktualizovanie a dopĺňanie podľa potreby. Časť spomínaného katalógového listu môžeme vidieť na *obrázku 3.1.1*. Statický list krovovej konštrukcie obsahuje:

a) Základné údaje o konštrukcii

Úvod katalógového listu obsahuje prehľadné informácie o analyzovanej konštrukcii:

- Typ a označenie konštrukcie, prípadne jej umiestnenie (napr. krokvový krov s hambálkami, vešadlo atď.),
- Celkové rozmery konštrukcie (dĺžka, výška, šírka) vzťahujúce sa na osový model,
- Rozmery a geometrické charakteristiky prierezov (A , I_y , I_z); pri atypických tvaroch sú uvedené aj schémy,
- Počet väzieb, trieda dreva, celková hmotnosť krovu, a prípadne ďalšie technické údaje.

b) Zat'azovacie schémy

Druhá časť obsahuje znázornenie zat'azovacích stavov:

- Stále zat'azenie (vlastná tiaž, krytina),
- Zat'azenie vetrom (tlak/sanie),
- Zat'azenie snehom
- Neredukované zat'azenie snehom - nezohľadňuje sklon a lokalitu

Každý stav je zobrazený samostatnou schémou s hodnotami v príslušných jednotkách.

c) Priebehy vnútorných síl a deformácie

Pre každý zat'azovací stav sú uvedené:

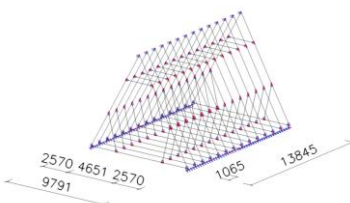
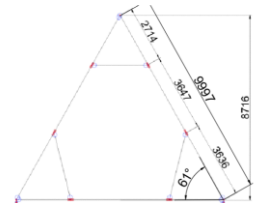
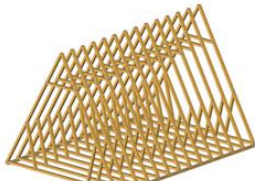
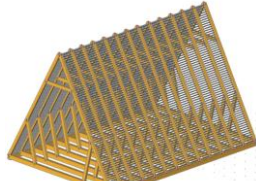
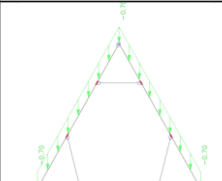
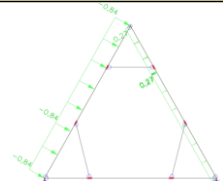
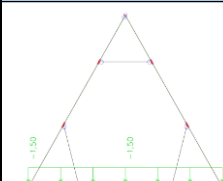
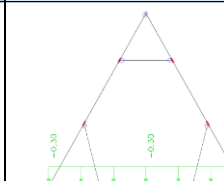
- Normálové sily (N), ohybové momenty (My), napätia (σ_x),
- Deformácie v 2D a 3D zobrazení (len pre základné zaťaženia).

d) Výsledky kombinácií zaťažení

Zobrazené sú výsledky kombinácií K01 až K04 podľa STN EN:

- N, My, σ_x , reakcie (vertikálne a horizontálne).

V prípade modelov s latovaním sú uvedené len deformácie, ktoré však postačujú na vyhodnotenie vplyvu priestorovej tuhosti konštrukcie.

01 Krovový krov s hambálkami a šikmými pätnými vzperami krokiev, bez pozdĺžneho zavetrenia						
3D statická schéma				2D statická schéma plná väzba		
						
Prierezy	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	I _y (mm ⁴)	I _z (mm ⁴)	Atypické prierezy (mm)
Krokva	160	220	3,52E+04	6,45E+05	4,69E+05	
Väzný trám	210	300	6,30E+04	1,58E+06	1,10E+06	
Hambálok	160	220	3,52E+04	6,45E+05	4,69E+05	
Pätná vzpera	160	220	3,52E+04	6,45E+05	4,69E+05	
Pomúrnica	290	220	6,38E+04	1,17E+06	1,54E+06	
Parametre statického modelu						
Uvažovaná trieda dreva		C27	3D model bez latovania		3D model s latovaním	
Plocha šikmej časti strechy (m ²)		276,81				
Priemet plochy strechy (m ²)		135,55				
Výška strechy (m)		8,716				
Spotreba drevnej hmoty (m ³)		24,7				
Hmotnosť strešnej konštrukcie (t)		10,66				
Počet plných väzieb (ks)		14				
Počet prážnych väzieb (ks)		0				
Časť výskytu plnej väzby		každá väzba				
Zaťaženie 2D plná väzba (kN/m ²)						
Stále zaťaženie	Vietor		Neredukovaný sneh		Sneh	
						

Obrázok 3.1.1 Vzor statického katalógového listu

3.2. Analytická tabuľka konštrukcií

Analytická tabuľka, bola vytvorená na základe všetkých katalógových listov a umožnila jednotné porovnanie a hodnotenie konštrukcií z hľadiska statickej účinnosti. Tabuľka obsahuje základné parametre ako vnútorné sily, deformácie, spotrebu materiálu, počet väzieb, výšku strechy či geometriu. Do analýzy boli zahrnuté dva kľúčové prvky – krokva a väzný trám – keďže sa vyskytujú vo všetkých typoch krovov a nesú rozhodujúce zaťaženia. Ich univerzálnosť

z nich robí vhodný základ pre medzi typové porovnanie. Vzor časti analytickej tabuľky je uvedený na *obrázku 3.2.1*.

ANALYTICKÁ TABUĽKA				
Číslo konštrukcie	1	2	3	
Plocha šikmej časti strechy (m2)	276,81	366,3	341,38	
Priemet plochy strechy (m2)	135,55	158,4	175,94	
Výška strechy (m)	8,716	11,038	9,165	
Spotreba drevenej hmoty (m3)	24,7	23,1	31,8	
Hmotnosť strešnej konštrukcie (t)	10,66	9,9	16,4	
Počet plných väzieb (ks)	14	5	16	
Počet práznych väzieb (ks)	0	12	0	
Časť výskytu plnej väzby	každá väzba	každá štvrtá	každá väzba	
Krokva				
b (mm)	160	140	170	
h (mm)	220	200	210	
A (mm2)	3,52E+04	2,80E+04	3,57E+04	
Iy (mm4)	6,45E+05	4,67E+05	6,25E+05	
Iz (mm4)	4,69E+05	3,27E+05	5,06E+05	
Maximálna hodnota deformácie bez latovania (mm)	Neredukovaný sneh	3,7	5	0,3
	Vietor	8,8	57,4	10,3
Maximálna hodnota deformácie s latovaním (mm)	Neredukovaný sneh	3,7	4,1	0,3
	Vietor	8,7	51,9	10,3
Najväčšia hodnota: Normálová sila N (kN)	-27,1	-49,83	-28,99	
Prislúchajúca kombinácia	K03 b)	K03 b)	K03 b)	
Najväčšia hodnota: Ohybový moment (kNm)	-9,05	-9,21	4,27	
Prislúchajúca kombinácia	K03 b)	K03 b)	K03 b)	
Najväčšia hodnota: Normálové napätie σ_x (MPa)	-7,4	-10,8	-4,8	
Prislúchajúca kombinácia	K03 b)	K03 b)	K03 b)	
Vážny trám				
b (mm)	210	160	210	
h (mm)	300	220	430	
A (mm2)	6,30E+04	3,52E+04	9,03E+04	
Iy (mm4)	1,58E+06	6,45E+05	3,24E+06	
Iz (mm4)	1,10E+06	4,69E+05	1,58E+06	
Najväčšia hodnota: Normálová sila N (kN)	-6,65	23,34	17,42	
Prislúchajúca kombinácia	K04	K01	K03 b)	
Najväčšia hodnota: Ohybový moment (kNm)	15,56	24,86	-15,91	
Prislúchajúca kombinácia	K03 b)	K03 b)	K03 b)	
Najväčšia hodnota: Normálové napätie σ_x (MPa)	5	-19,7	2,7	
Prislúchajúca kombinácia	K03 b)	K03 b)	K03 b)	
Celková tiaž (aj s bobrovkou) (kN)	315,55	353	400,55	
Horizontálny účinok vetra (kN)	145,05	183,48	163,95	

Obrázok 3.2.1 Časť analytickej tabuľky konštrukcií

4. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Táto kapitola obsahuje poznatky, ktoré viedli k návrhu experimentu, ako aj následné numerické výsledky slúžiace na jeho vyhodnotenie.

4.1. Koncept experimentu

Myšlienka experimentálneho merania vznikla pri analýze typových historických krovov uvedených v tejto práci. Riešený problém sa týka vplyvu latovania na pozdĺžny roznos zaťaženia, a to v dvoch prípadoch – pri bežnej funkcii krovu a pri poruche hlavného nosného prvku. Rozlišujeme „prirodzený“ roznos, kedy latovanie prenáša zaťaženie medzi priečnymi väzbami s rôznou tuhosťou, a „vynútený“ roznos, ktorý nastáva pri poškodení konštrukcie,

napríklad vplyvom degradácie alebo vlhkosti. Práve tento vynútený prenos zaťaženia bol kľúčovým prvkom skúmaným v rámci experimentu.

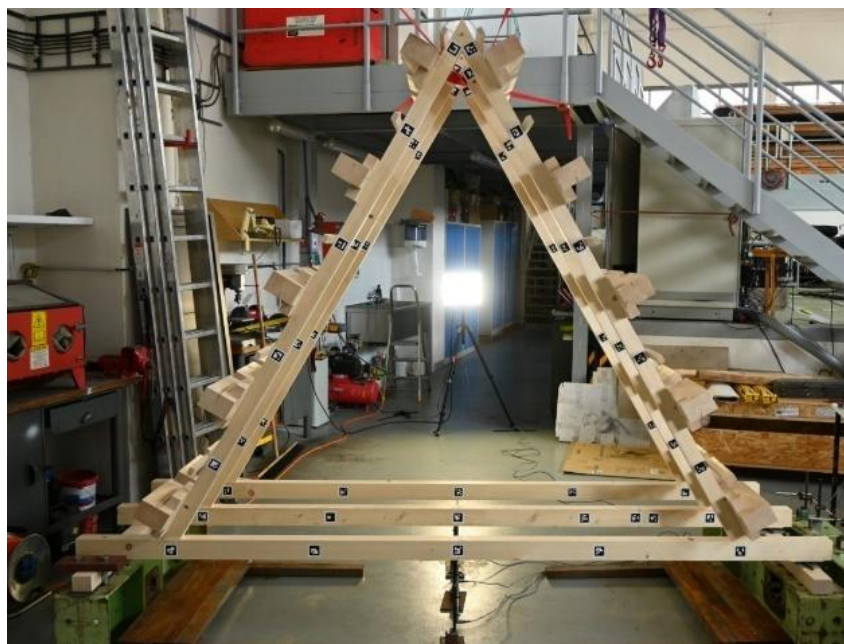
4.2. Experimentálny model

Na základe konzultácií s odborníkmi bol ako vzor zvolený krov nad presbytériom kostola Zvestovania Panny Márie v Chebe. Konštrukcia bola upravená pre potreby experimentu – zohľadňujúc zjednodušenie merania a analýzu dvoch hlavných javov: oslabenie väzného trámu a prenos zaťaženia latovaním do nepoškodených väzieb. Hoci pôvodný zámer počítal s piatimi väzbami, nakoniec boli vytvorené tri, prepojené latovaním. Model cielene vynechal vplyv strešnej krytiny, aby sa sledoval len účinok latovania.

Nevyhnutné zmeny zahŕňali aj nezvyčajné odsadenie krokvy, ktoré zabezpečilo vyšší ohybový moment vo väznom tráme. Model bol realizovaný v ÚTAM v Telči s podporou grantu NAKI II. Pri návrhu sa prihliadalo najmä na: jednoduchosť zostavenia, horizontálnu polohu porušovaného prvku (väzný trám), vhodné miesto oslabenia, výber hustoty latovania (pre simuláciu poškodenia), ako aj neovplyvnené uloženie balastu. Napriek absencii modelovej podobnosti so skutočným krovom bol systém vhodný na analýzu rozloženia vnútorných síl typických pre historické konštrukcie.

4.3. Rozmery a popis experimentálneho modelu

Pre experimentálny model strechy s tromi trojuholníkovými väzbami bola stanovená maximálna dĺžka prvkov do 3 metrov kvôli preprave a jednoduchšiemu zaťažovaniu. Konštrukcia bola vyhotovená presne podľa výkresov z kvalitného smrekového dreva. Stabilita modelu bola zaistená podopretím vo vrchole pomocou gurtní, ktoré zabránili vodorovnému posunu. Presnosť zostavenia bola overená meraním na mieste a zodpovedala projektovému návrhu. Fotodokumentácia modelu je na obrázkoch 4.3.1 až 4.3.2.



Obrázok 4.3.1 Zostavený nezaťažný experimentálny model - pohľad od dverí laboratória



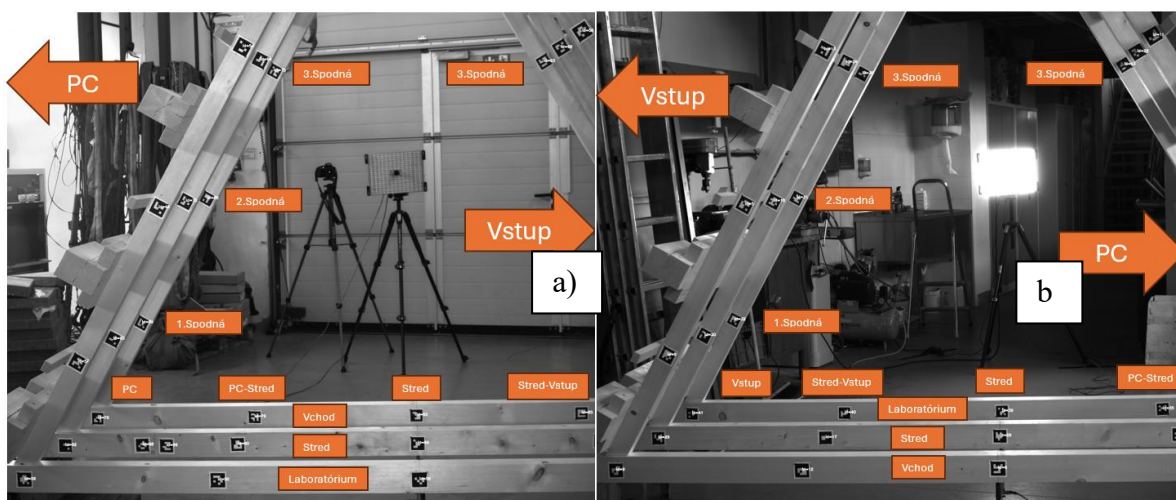
Obrázok 4.3.2 Zostavený nezaťažný experimentálny model - pohľad od priestoru laboratória

4.4. Popis merania experimentálneho modelu

Samotné meranie pozostávalo z viacerých krokov, ktoré boli realizované dvomi podrobnými metódami a doplnené bežným meraním pomocou metra a diaľkomeru.

4.4.1. *Optické – Fotogrametrické meranie*

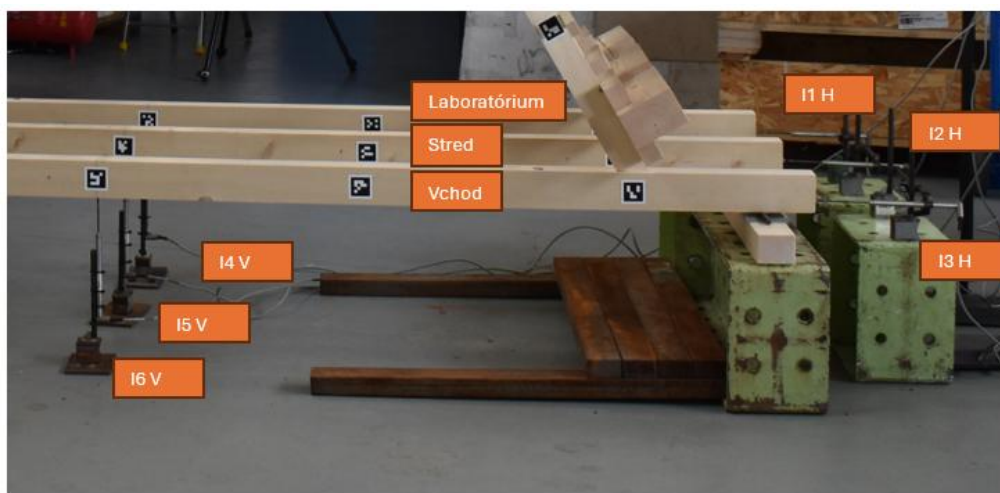
Pri optickom meraní boli na konštrukciu nalepené 4×4 cm terčiky (markery) v pravidelných rozstupoch – 500 mm na krokviach a 560 mm na väzných trámoch, na oboch stranách prvkov. V mieste narezávania trámu boli terčiky doplnené. Meranie prebiehalo dvomi kamerami – Cam1 (v laboratóriu) – *obrázok 4.4.1.1 po a)* a Cam2 (pri vstupe) – *obrázok 4.4.1.1 po b)*. Každý terčik mal jedinečné ID, spolu ich bolo 46, pričom sa rozlišovala aj poloha (vchod/stred/laboratórium) a orientácia (vstup/PC). Nie všetky terčiky bolo možné kamerovo snímať, preto sa zameralo iba na hlavné kritické body konštrukcie.



Obrázok 4.4.1.1 Zostavený nezaťažený experimentálny model - pohľad od priestoru laboratória

4.4.2. *Meranie pomocou indukčných meračov deformácií*

Ako druhá metóda bola použitá technika merania posunov pomocou indukčných snímačov deformácií (tzv. meracích ihl). Využitý bol merací systém Spider8 so šiestimi snímačmi. Merané boli vertikálne posuny stredových častí väzných trámov a horizontálne posuny ich okrajov. Umiestnenie meracích zariadení v strede väzného trámu a pri jeho okraji v oblasti posuvnej podpory je znázornené na *obrázku 4.4.2.1*, kde je taktiež doplnené označenie jednotlivých snímačov.



Obrázok 4.4.2.1 Poloha meracích ihiel (indukčných meračov deformácie)

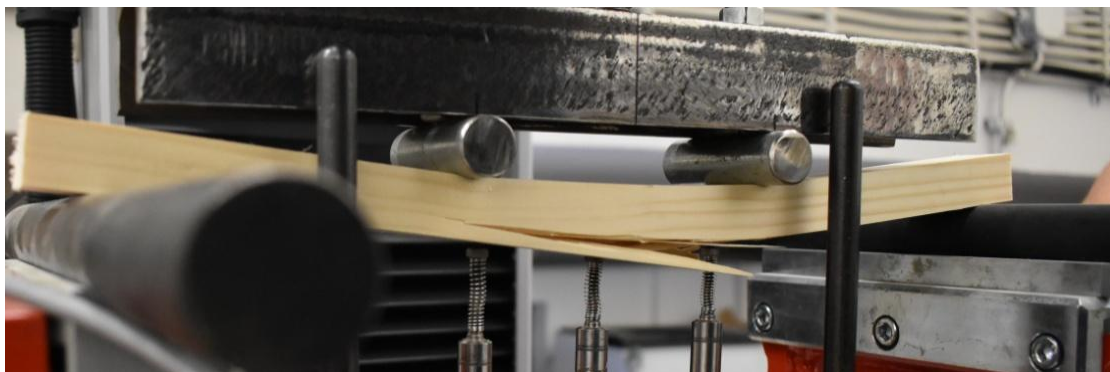
4.5. Celkové zhodnotenie experimentálneho merania modelu trojväzbového krovu

Experimentálne meranie modelu trojväzbového krovu možno hodnotiť ako úspešné, čo potvrdzujú tieto zistenia:

- Konštrukcia bola kvalitne zhotovená, predpoklady o vyššej pevnosti a module pružnosti reziva sa potvrdili materiálovými skúškami.
- Optické meranie spolu s indukčnými snímačmi deformácií priniesli zhodné výsledky.
- Zaťažovanie bolo čiastočne upravené priamo na mieste (ÚTAM Praha – Prosek) a ukázalo sa ako efektívne.
- Správanie modelu korešpondovalo s predpokladmi numerických výpočtov; ku kontrolovanému kolapsu došlo po narezávaní krajného väzného trámu.
- Rozdiely v tuhosti medzi väzbami potvrdili aj materiálové testy.
- Narezávanie znížilo tuhosť stredovej väzby a vytvorilo pružný kĺb.
- Prenos síl prostredníctvom latovania na nepoškodené väzby bol jasne zaznamenaný.
- Odoberaté boli vzorky z lát, krokiev a väzných trámov na ďalšie materiálové skúšky.
- Dôležitosť presného značenia bodov, dokumentácie a priebežného zápisu výsledkov sa potvrdila.
- Veľké množstvo dát bolo spracované v tabuľkách pomocou MS Excel.

4.6. Určenie materiálových charakteristík odobratých vzoriek

Na materiálové skúšky bolo pripravených 20 vzoriek, po 2 kusy z každej z 10 použitých lát na konštrukcii. Dĺžka vzoriek bola 400 mm, čo zodpovedá vzdialenosti medzi otvormi po klincoch. Na *obrázku 4.6.1* je zobrazená porušená vzorka po ukončení skúšky.



Obrázok 4.6.1 Porušená vzorka laty v skúšobnej zostave

Na základe pozorovaného správania konštrukcie počas merania na experimentálnom modeli boli formulované závery, ktoré je potrebné ďalej overiť pomocou numerickej analýzy. Pre presnú kalibráciu numerického modelu je nevyhnutné v analýze uvažovať čo najreálnejšie tuhostné charakteristiky konštrukčných prvkov. Prostredníctvom experimentálneho overenia na skúšobných vzorkách sa podarilo pomerne presne určiť moduly pružnosti jednotlivých prvkov. *Tabuľka č. 4.6-1* sumarizuje určené moduly pružnosti spolu s príslušnými pevnostnými triedami dreva, ktoré boli pre jednotlivé prvky uvažované v rámci numerického výpočtu. Uvádzané sú aj priemerné hodnoty modulu pružnosti a 5 % kvantil pevnosti v ohybe.

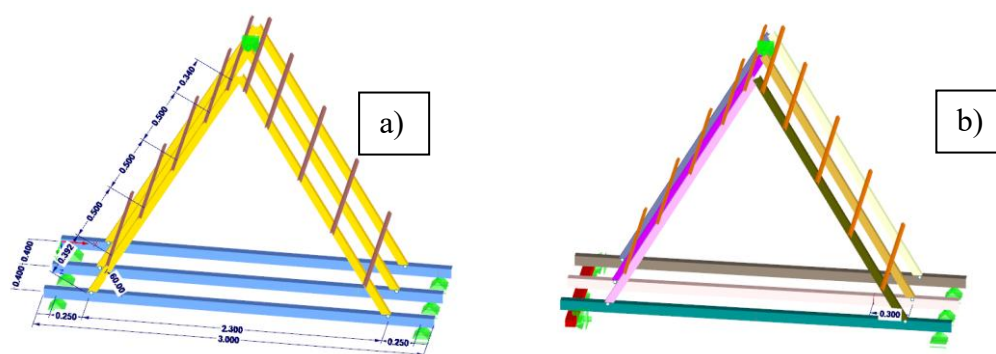
Tabuľka 4.6-1 Sumarizácia modulu pružnosti prvkov pre numerický model

Prvok	Modul pružnosti prvku na základe skúšok	Priemerné hodnoty modulu pružnosti	5 % kvantil pevnosti v ohybe	Uvažovaná trieda dreva prvku v numerickom modeli
Väzný trám laboratórium	10 GPa	10,8 GPa	-	C22
Krokva lab. PC (posuvná)	9 GPa	12,5 GPa	57,5 MPa	C18
Krokva lab. Vstup (pevná)	14 GPa	12,5 GPa	57,5 MPa	C40
Väzný trám stred	10 GPa	10,8 GPa	-	C22
Krokva stred PC (posuvná)	14 GPa	12,5 GPa	57,5 MPa	C40
Krokva stred Vstup (pevná)	9 GPa	12,5 GPa	57,5 MPa	C18
Väzný trám vchod	12 GPa	10,8 GPa	-	C30
Krokva vchod PC (posuvná)	14 GPa	12,5 GPa	57,5 MPa	C40
Krokva vchod Vstup (pevná)	14 GPa	12,5 GPa	57,5 MPa	C40
Latovanie	15 GPa	15,2 GPa	69,7 MPa	C45

5. VÝPOČTOVÁ ČASŤ

5.1. Numerická analýza – popis modelu

Numerická analýza bola spracovaná vo výpočtovom programe Dlubal RFEM pričom výhodou bolo najmä prehľadné zadávanie materiálového modelu do výpočtu. Zjednodušený numerický model experimentu je znázornený na *obrázku 5.1.1* po a), pričom schéma podrobnejšieho numerického modelu s miestom oslabenia sa nachádza na *obrázku 5.1.1* po b).



Obrázok 5.1.1 Schéma zjednodušeného a rozšíreného numerického modelu

V zjednodušenom numerickom modeli nie je zohľadnený prípoj podpernej konštrukcie na väzný trám ani tuhostná rôznorodosť jednotlivých väzieb (krokvy, väzné trámy a laty). Model uvažuje všetky prvky z materiálu C40 a predpokladá lineárne elastický materiálový model. V podrobnejšom modeli sú zohľadnené tuhosti prvkov podľa predchádzajúcej kapitoly tabuľka 5.9-2 a bi-lineárny materiálový diagram je aplikovaný iba na prvok oslabenia (2 mm prvok v uvažovanom reze).

5.2. Kalibrácia numerického modelu - zaťažovanie

- Numerický model vykazuje dobrú zhodu výsledkov s realizovaným meraním. Zhoda v posunoch (deformáciách) väzných trámov je z hľadiska riešenia ďalšej problematiky práce najpodstatnejšia.
- Kalibrácia numerického modelu z hľadiska rozdielu posunov krokiev taktiež prebehla, avšak zvolená bola tuhosť zodpovedajúca realizovaným materiálovým skúškam krokiev. V rámci ďalšieho riešenia problematiky by bolo vhodné venovať pozornosť tomuto bodu a tuhosť krokiev čiastočne doladiť.

- Je zjavné, že zvolené rozdielne materiálové charakteristiky prvkov priečnej väzby v numerickom modeli, ovplyvňujú roznos zaťaženia medzi priečnymi väzbami už vo fáze zaťažovania konštrukcie. Fenomén je reprezentovaný vznikom napätia na rozšírenom numerickom modeli v latovaní. Takmer s istotou je možné tvrdiť, že obdobným spôsobom došlo k namáhaniu latovania aj v rámci skutočnej konštrukcie experimentálneho laboratórneho modelu, kde je zjavné, že príslušné merané body v rámci jednotlivých väzieb vykazovali rôzne posuny.

5.3. Postupné narezávanie konštrukcie – tuhosť pružného kĺbu

- Uvádzaný postup prichádza s myšlienkou nahradenia poškodenia (zárezu) pružným kĺbom v ohybe. V kapitole je predstavený spôsob určenia tuhosti pružného kĺbu pre experimentálne a numericky skúmanú konštrukciu.
- Je zjavné, že výsledky numerického modelovania oslabenia a experimentálne získaných údajov sa líšia. Zavedením pružného kĺbu v zmysle experimentálneho merania bola dosiahnutá lepšia zhoda porovnávaných veličín. Numerický model s oslabením v reze vykazoval vyššie tuhosti pružných kĺbov v porovnaní s numerickým modelom s nakalibrovaným pružným kĺbom (v zmysle experimentálneho merania).
- V kapitole je predstavená myšlienka nahradenia zárezu (lokálneho porušenia), porušením na väčšej dĺžke (simulácia odhnutia) pomocou tuhosti pružného kĺbu.
- V rámci riešenia práce bola viackrát preberaná myšlienka zovšeobecnenia tohto postupu a aplikovateľnosť na rôzne typy konštrukcií. V rámci práce bola venovaná pozornosť určovaniu pružinovej tuhosti aj na iných numerických modeloch. Určitá podobnosť správania sa konštrukcie ako celku bola identifikovaná.
- Pre obdobné konštrukčné systémy historických krov (č.1, č.3 a č.4) a obdobné miesto porušenia príslušného krovu (väzný trám v mieste uloženia) by nastali najvýraznejšie zmeny v deformáciách konštrukcie pri oslabeniach zodpovedajúcim zárezu viac ako 50% výšky prierezu – hodnoty tuhostí pružných kĺbov začínajú prudko klesať a dosahujú hodnoty ≈ 0 (dokonalý kĺb).
- V rámci ďalšieho výskumu by bolo vhodné zohľadniť okrem pružinovej tuhosti v ohybe aj osovú tuhosť v mieste oslabenia.

5.4. Postupné narezávanie konštrukcie – analýza stavu vnútornej napätosti konštrukcie

- Výsledky numerického modelovania narezávania sú v zhode s experimentálnym meraním, pružný kĺb v mieste rezu vhodne vystihuje vplyv zárezu na celkové dosiahnuté posuny/deformácie konštrukcie modelu.
- Z prezentovaných výsledkov je zjavná výrazná zmena (nárast) napätosti na latách vo fázach merania, rez 4cm až rez 6cm, pozorujeme nárast napätia na spodnej late pri mieste rezu až o 11MPa.
- Najväčšia zmena v správaní konštrukcie numerického, ale aj experimentálneho modelu je vo fáze rez 7cm a model po porušení väzného trámu. Nárast hodnoty napätia na late bol až na hodnotu 49MPa. Značný rozdiel je aj v sile v klincovom prípoji, tu ťahová sila narástla až na hodnotu 0,48kN.
- Charakteristickým znakom porušeného väzného trámu konštrukcie je postupná zmena ťahovej osovej sily vo väznom tráme na tlakovú. Pri konštrukcií pred rezom bola ťahová sila 0,28kN, v prípade zárezu 7cm bola táto hodnota -0,58kN (tlak). Tento jav bol dokumentovaný aj v rámci experimentálneho merania – po porušení väzného trámu bol väzný trám opretý o betónové bloky slúžiace na zabránenie náhleho zrútenia , zachytávajúc pílkou použitú pri rezaní.
- Zmena osových síl na krokve je obdobne viditeľná od tlakovej sily -1,25kN pri konštrukcií bez porušenia až po hodnotu 0,71kN – ťahová sila pri reze 7cm. Po úplnom prerezaní väzného trámu vznikla v krokve sila na úrovni 0,2kN.
- Klincový prípoj krokvy a latic sa počas experimentálneho merania povytiahol. Na základe numerickej analýzy bol tento jav zhodnotený ako očakávaný. V rámci ďalšieho experimentálneho respektíve numerického modelovania by bolo vhodné sa zamerať na správanie klincových spojov lát. Prispelo by to k ďalšiemu rozvoju problematiky vzájomného spolupôsobenia väzieb krovu s uvážením latovania.

5.5. Vyhodnotenie numerického modelovania experimentálneho modelu

- Boli zostavené dva typy modelov – zjednodušený a rozšírený. Porovnaním výsledkov je zreteľne viditeľné, že aj malá zmena tuhosti prvku ovplyvňuje celkovú deformáciu (posun) referenčných meraných alebo numericky modelovaných bodov konštrukcie.

- Kalibrovaný numerický model (rozšírený) dosahuje počas fázy zaťažovania požadovanú zhodu s experimentálne nameranými hodnotami. Zhoda v oblasti väzných trámov bola v rámci kalibrácie rozhodujúca.
- Vo fáze narezávania väzného trámu je predstavený spôsob určenia tuhosti pružného kĺbu pre experimentálne skúmaný model. Výsledky sú následne numericky porovnané.
- Predstavený je aj prístup, pri ktorom je „zárez“ nahradený „oslabením“ prierezu na väčšej dĺžke.
- Pozdĺžny roznos zaťaženia prostredníctvom latovania je doložený numerickými výsledkami vo forme vnútorných síl, napätí a posunov (deformácií). Medzi stavom úplného porušenia väzného trámu a stavom väzného trámu s „dokonalým kĺbom“ napr. konštrukcia so zárezom 7cm je výrazný rozdiel v rámci vnútornej napätosti aj deformácií latovania.
- Aj pri zdanlivo jednoduchom modeli konštrukcie je nevyhnutná detailná analýza okrajových podmienok uloženia, keďže tieto významne ovplyvňujú celkové prerozdelenie vnútornej napätosti v konštrukcii.

6. ZÁVER

6.1. Možnosti využitia statických katalógových listov pre prax

Statické katalógové listy predstavujú dôležitý nástroj na systematizáciu poznatkov o historických krovových konštrukciách. Umožňujú prehľadné evidovanie a porovnávanie údajov o rôznych typoch krovov, vrátane geometrie, materiálov a výsledkov statickej analýzy. Slúžia tak nielen statikom, ale aj architektom, projektantom či pamiatkarom pri vyhľadávaní vhodných konštrukčných riešení.

Listy obsahujú analytické výstupy, ktoré porovnávajú modely historických krovov z hľadiska statického správania. Zdôrazňuje sa pritom význam inžinierskeho úsudku, keďže výsledky výpočtov závisia od zvoleného modelu, predpokladov a zjednodušení.

Dôležitým výstupom je analytická tabuľka umožňujúca porovnanie krovov z hľadiska únosnosti, materiálovej efektivity a geometrie. Zameriava sa najmä na krokvy a väzné trámy ako kľúčové nosné prvky. Porovnávanie vnútorných síl, deformácií a spotreby materiálu poskytuje základ pre optimalizáciu návrhu.

Praktický význam sa potvrdil aj v praxi – napríklad pri riešení rekonštrukcie historickej budovy, kde katalóg pomohol nájsť vhodné riešenie spĺňajúce požiadavky pamiatkarov aj statikov.

Katalógové listy tak predstavujú cenný zdroj poznatkov, ktorý podporuje kvalitný návrh, ochranu kultúrneho dedičstva a efektívnu obnovu historických krovových systémov.

6.2. Odborný a praktický prínos výsledkov pre inžiniersku prax

Výskum priniesol dôležité poznatky pre statické posudzovanie a obnovu historických krovov. Ukázalo sa, že degradácia prvkov ako krokvy či väzné trámy výrazne ovplyvňuje statické správanie konštrukcie – mení rozloženie vnútorných síl a deformácií, čo môže viesť až ku kolapsu. Aj čiastočné poškodenia preto vyžadujú dôkladné statické vyhodnotenie.

Významnú úlohu zohráva aj latovanie – okrem podkladu pre krytinu prispieva k prerozdeleniu zaťaženia a stabilite krovu. Hustejšie latovanie preukázateľne znižuje deformácie, najmä pri oslabení nosných prvkov, čo je dôležité pri rekonštrukciách poškodených krovov.

Experimentálny model overil prenos zaťaženia medzi väzbami a potvrdil správnosť numerických simulácií. Výsledky dokázali, že latovanie prenáša zaťaženie pri poškodení stredovej väzby a že simulácia porúch pomocou oslabenia prierezu je účinnou alternatívou k deštruktívnym metódam. Tieto zistenia poskytujú spoľahlivý základ pre návrh sanácií a ochranu historických konštrukcií.

6.3. Ďalší možný postup v problematike a odporúčanie pre ďalší výskum

Na základe výsledkov sa ako ďalší krok odporúča experimentálne overiť viacväzbové systémy s rôznym stupňom poškodenia a prehĺbiť analýzu vplyvu latovania pri rôznych typoch krytín a spôsoboch ich pripojenia. Zahrnutie reálneho uloženia krytiny by umožnilo presnejšiu simuláciu zaťaženia. Dôležité je aj dlhodobé sledovanie konštrukcií v reálnych podmienkach, vrátane vplyvu vlhkosti, degradácie a zmien tuhosti. V numerickom modelovaní sa odporúča rozvíjať nelineárne modely a skúmať variabilitu uloženia ako významný faktor stability. Získané dáta môžu slúžiť ako základ pre metodiky diagnostiky a návrh zásahov do historických krovov. Perspektívou je vytvorenie digitálnej databázy typizovaných konštrukcií s výpočtovými výstupmi a rozšírenie výskumu o regionálne konštrukčné varianty. Význam má aj skúmanie kombinovaných porúch (napr. degradácia a nerovnomerné zaťaženie) a využitie pokročilých 3D meracích technológií. Pre lepšiu kalibráciu modelov sa odporúča systematický odber a testovanie historického reziva. Výskum má potenciál prispieť k štandardom v oblasti ochrany historických krovov, najmä ak bude podporený spoluprácou s remeselníkmi, pamiatkarmi a multidisciplinárnym tímom. Je pripravený na ďalší rozvoj a má reálny prínos pre prax.

Zoznam použitej literatúry

- [1] BLÁHA, J. - BUZEK, J. - KYNCL, T. (2020) Atlas historických krovů České republiky. Telč 2020, ISBN 978-80-86-24-6-86-4.
- [2] SUCHÝ, L., ZACHAROVÁ, D., a kol. *Metodika identifikácie a výskumu historických krovov*. 1. vyd. Bratislava: 2018. ISBN 978-80-89175-85-7.
- [3] BLÁHA, J. (2010) Krovy z pomezí jižních Čech a Moravy inspirované úspornými návrhy Michaela Ranka, Průzkumy památek 2010.
- [4] VINAŘ, J., KYNCL, J.: *Historické krovy, Typológia, prieskum a opravy*, 2. vyd. ISBN 978-80-271-3189-1.
- [5] KOHOUT, J., TOBEK, A. *Tesařství z pohledu dneška*, vyd.8 , Grada Publishing, s.r.o., 1996, ISBN 80-7169-413-4
- [6] GERNER, M. *Tesařské spoje*, 1. vydání, Grada Praha, 2003, ISBN 80-2470076-X.
- [7] JELÍNEK, L., ČERVENÝ, P., RÁHA F., *Nové krovy*, vyd.1, Praha: 2017, ISBN 9788087438947.
- [8] KRUPKA, J., SLÁNSKÝ, O., VANEK, J., Kvalita sanací historických krovů, Praha: 2011.
- [9] SUCHÝ, L., KRUŠINSKÝ, P., GRÚŇOVÁ, Z., ĎURIAN, K., ZACHAROVÁ, D., KORENKOVÁ, R.: *Historické krovy v regiónoch Oravy a Kysúc*. Žilinská univerzita v Žiline, 2010,
- [10] KOUDELOVÁ, J., KLOIBER, M., a kol. *Pod ochranou svatého Josefa, Příběh tesařského řemesla v českých zemích : kritický katalog stejnojmenné výstavy, Mendelova univerzita v Břně*, 2020, ISBN 978-80-86246-83-3, 978-80-7509-775-0, 978-80-7509-744-6, 978-80-86246-80-2.
- [11] MARÍK, M., *Bakalárska práca: Spoje drevených konštrukcií*, Praha: 2018
- [12] RAPOVÁ, L: *Diplomová práca: Historický vývoj krovů*, Plzeň:2018.
- [13] VONŠOVSKÝ, P., *Diplomová práca: Statická analýza střešních konstrukcí 18. století*, Praha: 2023.

Zoznam publikácií autora

- [V1] MARTINKOVIČOVÁ, Silvia., Typológia a história tesárskych spojov. In: BISTÁK, Andrej. *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering: 32nd 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. October 26th 2022, Bratislava, Slovakia [elektronický zdroj]. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2022, s. 468--473. ISBN 978-80-227-5251-0.
- [V2] MARTINKOVIČOVÁ, Silvia., Diagnostika a modelovanie historických krovov. In: ŠUHAJDOVÁ, Eva; NOSEK, Jakub. Juniorstav 2023: sborník příspěvků. 25. mezinárodní doktorská konference stavebního inženýrství. Brno, ČR, 26. 1. 2023 [elektronický zdroj]. 1. vyd. Brno : ECON publishing, 2023, s. 357--363. ISBN 978-80-86433-80-6.
- [V3] MARTINKOVIČOVÁ, Silvia., Statické pôsobenie historického krovu. In: GOCÁL, Jozef. Zborník prednášok zo 46. aktívu pracovníkov odboru oceľových konštrukcií: 25. – 26. máj 2023, Oščadnica / [elektronický zdroj]. 1. vyd. Žilina : EDIS, 2023, s. 172--181. ISBN 978-80-554-1967-1.
- [V4] MARTINKOVIČOVÁ, Silvia., Analýza modelovania stuženia krovu v MKP modeli. In: BISTÁK, Andrej. Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering (AACEE 2023). Bratislava: Spektrum STU, 2023, s. 404--410. ISBN 978-80-227-5378-4.
- [V5] MARTINKOVIČOVÁ, Silvia., SANDANUS, Jaroslav., Analysis of the influence of a tension steel rod in a historical truss roof. In: Dřevostavby 2024: sborník přednášek. Volyně, ČR, 26. - 27. 3. 2024. Volyně : Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola Volyně, 2024, s. 57--69. ISBN 978-80-86837-07-9.
- [V6] MARTINKOVIČOVÁ, Silvia., SANDANUS, Jaroslav., VONŠOVSKÝ, Pavel., Statické posúdenie krovov z 18. storočia. In: PLATKO, Peter. 47. aktív pracovníkov odboru oceľových konštrukcií. Košice: Technická univerzita Košice, 2024, s. 109--116. ISBN 978-80-553-3305-2.
- [V7] MARTINKOVIČOVÁ, Silvia., Statické pôsobenie krovov z hľadiska ich historického vývinu. In: HAŠŠOVÁ, Zuzana. Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering (AACEE 2024). Bratislava: Spektrum STU, 2024, s. 357--364. ISBN 978-80-227-5461-3.
- [V8] BRODNIANSKY, JÁN., MARTINKOVIČOVÁ, Silvia., Lano v stavebných konštrukciách – materiál, koncovky, životnosť lanových prvkov. TZB-info.cz.
- [V9] BRODNIANSKY, JÁN., MARTINKOVIČOVÁ, Silvia., Lano v stavebných konštrukciách – terminológia lán. TZB-info.cz.
- [V10] MARTINKOVIČOVÁ, Silvia., BRODNIANSKY, JÁN., VONŠOVSKÝ, Pavel., BLÁHA JIŘÍ., Typické historické krovové systémy. TZB-info.cz.