

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Stavebná fakulta
Katedra

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

ANALÝZA ÚČINKOV DOPRAVNEJ SEIZMICITY NA VYBRANÉ STAVBY

Ing. Daniel Ďugel

Žilina Jún 2025

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

Predkladateľ: Ing. Daniel Ďugel

Školiteľ: doc. Ing. Daniel Papán

Oponenti: 1. prof. Ing. Marián Drusa, PhD.

 2. doc. Ing. Stanislav Seitl, Ph.D.

 3. prof. Ing. Ján Benčat, PhD.

Autoreferát bol rozoslaný dňa

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 14.08.2025 o 11:00 hod.

v zasadačke dekanátu AE 307 na Stavebnej fakulte Žilinskej univerzity v Žiline, Univerzitná 8215/1, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou spoločnou odborovou komisiou dňa

študijný odbor:

študijný program:

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 spoločnej odborovej komisie
Meno podľa študijného odboru

ÚVOD

Zvyšujúca sa intenzita dopravy v dôsledku urbanizácie a mobility obyvateľstva spôsobuje narastajúce dynamické zaťaženie objektov situovaných v blízkosti dopravných trás. Tieto vibrácie, označované ako technická seizmicita, síce obvykle nespôsobujú okamžité poškodenie, no ich dlhodobé pôsobenie môže viesť k únave materiálu, vzniku trhlín a zhoršeniu mechanických vlastností konštrukcií.

Zvlášť rizikovým zdrojom technickej seizmicity je železničná doprava, ktorá vďaka vysokým hmotnostiam a opakovanej frekvencii predstavuje významné dynamické zaťaženie. V prípade historických objektov, ktoré sú zhotovené z materiálov a konštrukčných systémov nepočítajúcich s takýmto zaťažením, môže dôjsť k nezvratným škodám. Slovenská národná príloha k STN EN 1998-1 preto oprávnené zaraďuje tieto stavby medzi najcitlivejšie konštrukcie z hľadiska dynamických účinkov.

Predkladaná dizertačná práca vznikla na Katedre stavebnej mechaniky a aplikovanej matematiky SvF ŽU v Žiline. Jej cieľom je analyzovať vplyv technickej seizmicity na historické objekty kombináciou in-situ meraní, laboratórnych testov, numerického modelovania a vývoja simulačného prvku z recyklovaného, ekologicky zameraného kompozitného materiálu. Tento prvok umožňuje akcelEROvané sledovanie degradačných procesov s cieľom predikcie dlhodobého správania sa konštrukcií.

Výskum prebiehal na historických stavbách – kostoloch vo Višňovom, Turčeku, Horných Krškanoch a kaštieli v Hybiach. Práca zahŕňa aj vývoj degradačných kriviek materiálu vystaveného kyseline HF a hodnotenie výsledkov pomocou metódy konečných prvkov. Záverečné časti sa zameriavajú na interpretáciu údajov a návrh monitorovacích opatrení pre prax.

1 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Dizertačná práca sa zaoberá analýzou účinkov technickej seizmicity, konkrétne vibrácií vyvolaných dopravou, na historické stavby.

Cieľom výskumu je sledovanie dynamickej odozvy historických objektov a vývoj experimentálneho simulačného prvku z inovatívneho materiálu, ktorý umožňuje urýchlenie degradačných procesov. Tento prvok slúži na predvídanie degradácie objektu, pri ktorom je osadený.

V rámci práce boli realizované kombinované in-situ a in-labo merania na vybraných objektoch (kostol vo Višňovom, Turčeku, Horných Krškanoch a kaštieľ v Hybiach), ktorým predchádzalo skutkové zameranie objektov s fotodokumentáciou a tvorba numerických výpočtových modelov založených na metóde konečných prvkov.

Súčasťou výskumu je aj návrh a testovanie inovatívneho materiálu na báze cementu, keramiky a polyuretánu, ktorý bol vystavený účinkom kyseliny fluorovodíkovej (HF) s cieľom simulovať urýchlenú degradáciu. Výsledky poukazujú na možnosti predikcie správania sa stavieb pod dlhodobým dynamickým zaťažením a navrhujú spôsob efektívneho monitorovania a diagnostiky stavu historických konštrukcií.

Tézy dizertačnej práce

- Identifikácia stavieb vo vzťahu k sledovaniu vývoja degradácie nosných prvkov historických budov (kostoly, kaštiele...).
- Experimentálnou cestou sledovať amplitúdovú a frekvenčnú skladbu náhodných procesov – dynamickej odozvy od technickej seizmicity vyvolanej dopravou.
- Vytvoriť numerické výpočtové modely na odvodenie dynamických parametrov.
- Návrh monitorovacieho prvku z inovatívneho materiálu a sledovanie zmien jeho parametrov vplyvom urýchlenej degradácie skúškami in-situ a in-labo.

2 METODIKA DIZERTAČNEJ PRÁCE

Účelom experimentálneho merania je porovnať výsledky merané na existujúcom objekte, ktorý má vlastné okrajové podmienky, s numerickým výpočtovým modelom ktorého okrajové podmienky sú zadane pri vyhotovovaní modelu. Dôležitou súčasťou výsledkov meraní je správne naladenie vytvoreného modelu.

Je však nutné prvotné vyhotovenie modelu pred experimentálnym meraním z dôvodu nadväznosti umiestňovania meracej aparatury na miesta, ktoré sú v modeli kritické a predpokladá sa tak aj pri reálnom objekte.

Následným meraním v konkrétnom objekte sú obdržané hodnoty vlastných frekvencií a tvarov, ktoré sa porovnávajú s pôvodným numerickým modelom. Ten je následne odlaďovaný, tak aby simuloval reálne merania. Proces odladenia je riešený systematicky a iteratívne, za účelom dosiahnutia najpresnejšej zhody meraní in-situ s modelom.

Takto odladený model môže byť použitý pre odhad meraných, ale aj iných potrebných hodnôt v nových miestach, bez nutnosti osadzovania ďalšej meracej techniky. Je však vhodné overenie funkčnosti modelu s inými, novými alebo ďalšími meraniami in-situ pre utvrdenie správnej funkčnosti.

Spoločne s meraniami budú pri objektoch osádzané senzorické prvky z inovatívneho materiálu, ktorý bude urýchlene degradovaný kyselinou fluorovodíkovou (HF) a tým bude simulovať referenčné body v čase $t = 0$ a v čase $t = x$ rokov v závislosti od degradačnej skupiny.

Takto vyhotovený, osadený prvok dynamicky zaťaženi spoločne s objektom pri ktorom je meaný bude slúžiť na extrapoláciu a škálovanie životnosti objektov. K tomu budú slúžiť namerané dynamické parametre a ich parametrizovanie za pomoci vedeckých publikácií.

3 PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

Technická seizmicita predstavuje narastajúci problém súvisiaci s rastúcou intenzitou a rýchlosťou dopravy. Ide o špecifický druh vibrácií, ktoré sa od prirodzenej seizmicity líšia vyššími frekvenciami – obvykle o jednu magnitúdu – a častejším opakovaním [1]. Tieto opakované dynamické účinky sa šíria geologickým prostredím a môžu pri dlhodobom pôsobení viesť k poruchám ako napríklad vznik a šírenie trhlín. Prvé merania technickej seizmicity sa datujú už do roku 1937, keď boli zaznamenané vibrácie prenášané z dopravy do geologického podlažia [2].

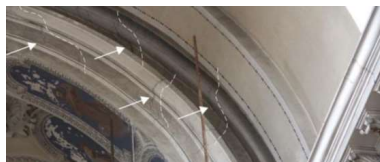
V súčasnosti sa historické stavby čoraz častejšie nachádzajú v blízkosti významných dopravných koridorov. Tento stav je dôsledkom prirodzeného vývoja železničnej a cestnej dopravy. V dôsledku opakovaného zvyšovania výškových úrovní komunikácií dochádza k paradoxom, ako je zníženie pôvodných 1. nadzemných podlaží historických budov na úroveň suterénu, čo dokumentuje aj situácia na Rynek Główny v Krakove.

Na takúto zmenu zaťažovacích podmienok pôvodné objekty spravidla neboli navrhnuté. Ich konštrukcie sú tuhšie, často bez dilatčných prvkov, s tradičnými materiálmi a bez vystuženia. Vibrácie prenášané skrz podlažie tak môžu mať za následok degradáciu týchto objektov. Výskum týchto vplyvov sa preto stal dôležitou témou vedecko-výskumných tímov, najmä s cieľom zachovať kultúrne dedičstvo a zabezpečiť komfort a bezpečnosť obyvateľov.

Jedným z analyzovaných prípadov je historický kostol skúmaný výskumníkmi z ČVUT v Prahe, kde vplyvom technickej seizmicity vznikajú a šíria sa trhliny v klenbových konštrukciách [1]. Títo autori vytvorili simulačný model klenby v mierke 1:1, ktorý bol následne vystužený CFRP lamelami [3]. Ich výskum sa venuje viacerým objektom ohrozeným týmto typom zaťaženia.



(a)



(b)

Obrázok 1 : Kostol (a) pohľad (b) trhliny prevažne spôsobené technickou seizmicitou [1]

Podobné prípady sú známe aj zo zahraničia. V Číne bol predmetom výskumu známy historický Pavilón Feiyun, ktorý sa nachádza v blízkosti frekventovanej cesty. Štúdia preukázala, že pri prechode nákladného vozidla s hmotnosťou 40 ton pri rýchlosti 30 km/h dochádza k prekročeniu limitných hodnôt vibrácií, ktoré môžu viesť k poškodeniu konštrukcie [4]. Stav objektu dokumentujú aj priložené fotografie, zachytávajúce poškodenia v exteriéri aj interiéri [5].

Zaujímavým prípadom je tiež Zvonica v Xi'ane (Čína), postavená v roku 1384, pod ktorou je plánované vedenie metra. Analýzy ukázali, že aj keď dynamické účinky metra budú prítomné, je možné ich vhodným návrhom konštrukčných prvkov a detailov eliminovať tak, aby nedošlo k ohrozeniu statiky historického objektu [6, 7].

Z uvedeného vyplýva, že dopravou indukovaná technická seizmicita má preukázateľné dopady na historické objekty a je preto nevyhnutné tieto vplyvy monitorovať, modelovať a predvídať. Moderné výpočtové nástroje, numerické simulácie, ako aj rastúce databázy ohrozených objektov [8] vytvárajú priestor pre komplexný prístup k ochrane kultúrneho dedičstva. Výsledkom sú nielen vedecké publikácie a simulačné modely, ale aj praktické odporúčania pre návrh infraštruktúry v historických centrách miest.

4 TEORETICKÁ ČASŤ

Vibráciou rozumieme striedavý pohyb okolo rovnovážnej polohy. V kontexte technickej seizmicity ide najčastejšie o chvenie základovej pôdy alebo iných masívnych telies – napríklad pri prejazde vlakovej súpravy, kedy vznikajú vibrácie v železničnom spodku a zvršku, ktoré sa následne šíria geologickým prostredím až k objektom v blízkosti trate [11]. Tieto vibrácie predstavujú formu prenosu energie do prostredia, a možno ich charakterizovať ako vlnenie.

Rozsah účinkov závisí najmä od:

hmotnosti zdroja a frekvenčných parametrov vibrácií,
vzdialenosti od objektu,

charakteru geologického podložia,

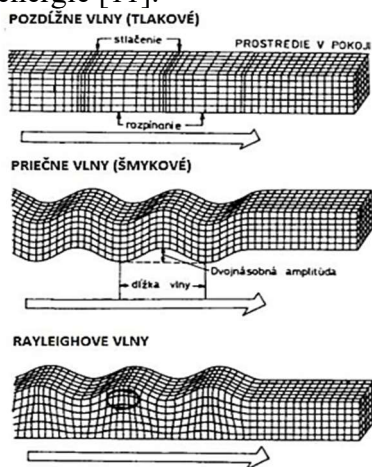
typu a tuhosti základov stavby.

Technická seizmicita zvyčajne zahŕňa všetky typy seizmických vln:

P-vlny (pozdlžne), najrýchlejšie, vyvolávajú striedavý tlak a ťah,

S-vlny (priečne), spôsobujú posun kolmo na smer šírenia,

Rayleighove vlny, povrchové, s výrazným energetickým podielom – až 60 % z celkovej energie [11].



Obrázok 2: Schematické znázornenie P-, S- a Rayleighových vln [11]

Rýchlosti šírenia vln závisia od fyzikálnych vlastností podložia. Pre ich výpočet možno použiť vzťahy:

$$\text{Pozdĺžne P-vlny} \quad c_p = \sqrt{\frac{E \cdot (1-\nu)}{\rho \cdot (1-2\nu) \cdot (1+\nu)}} \quad (1)$$

$$\text{Priečne S-vlny} \quad c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot 2 \cdot (1+\nu)}} \quad (2)$$

$$\text{Rayleighove vlny} \quad c_R \approx \frac{c_s \cdot (0,86 + 1,14 \cdot \nu)}{1 + \nu} \quad (3)$$

Kde:

ρ	-	objemová hmotnosť,
E	-	modul pružnosti v tlaku,
G	-	modul pružnosti v šmyku,
ν	-	Poissonov súčiniteľ.

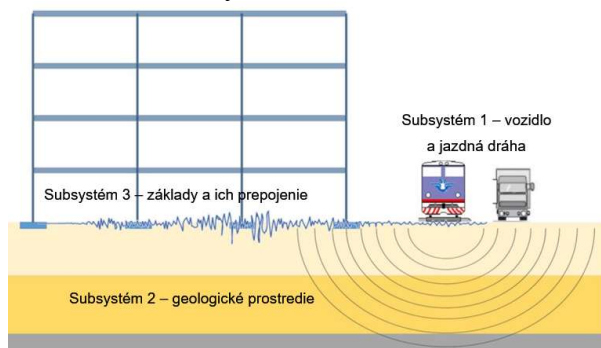
• Subsystemy v procese technickej seizmicity

Proces vzniku a šírenia technickej seizmicity od dopravy je komplexný – ovplyvnený štruktúrou terénu, typom stavby aj charakterom zdroja. Z dôvodu výpočtovej náročnosti sa pri numerickej simulácii systém zvyčajne delí na viacero subsystemov ([11] [12] [13] [14] [15]):

Pohybujúce sa vozidlo a jazdná dráha,

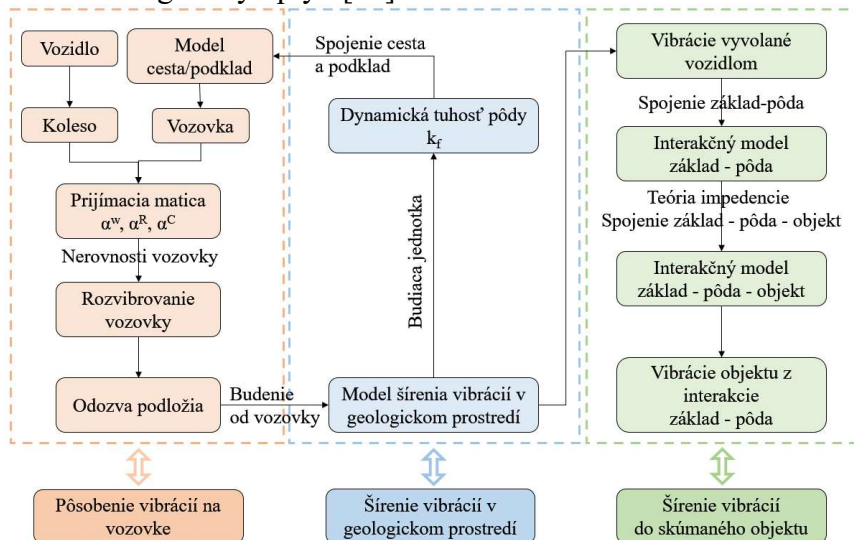
Geologické podložie (vrstevnaté, nehomogénne),

Základy a konštrukcia stavby.



Obrázok 3: Schéma interakcie subsystemov v procese dopravnej seizmicity [16]

Prvky mimo týchto subsystémov (napr. ľudia, prístroje, IT technika) pôsobia ako prijímače vibrácií, na ktoré môže mať technická seizmicita negatívny vplyv [12].



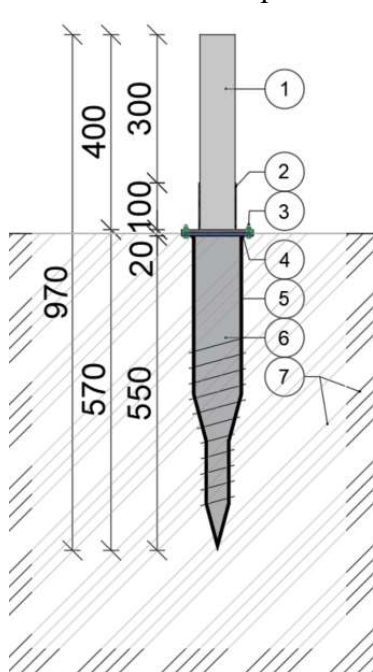
Obrázok 4: Semi-analytické modelovanie väzieb medzi subsystémami [17]

• Výroba a použitie simulačného prvku

Skúmané prvky boli navrhnuté v dvoch variantoch – in-labo a in-situ – s cieľom umožniť porovnanie výsledkov v riadených aj reálnych podmienkach. Prvky určené pre laboratórne testovanie (in-labo) boli prevažne valcovitého tvaru pre stanovenie tlakových vlastností, v niektorých prípadoch hranolovité pre ohybové skúšky. Odlievajú sa do plastových foriem a po vybratí dozrievajú v prostredí s upravenými podmienkami pre urýchlenú degradáciu. Vzorky boli zaznamenané a podrobené sérii nedeštruktívnych aj deštruktívnych testov pre analýzu vývoja vlastností v čase.

Simulačné prvky in-situ boli zhotovené tak, aby umožnili umiestnenie priamo na skúmané objekty. Ich jadro tvorí kompozitná

vzorka fixovaná na oceľovom vrute, ktorý je mechanicky zafixovaný do podložia. Prvok je konštruovaný tak, aby vystupoval nad terén, kde je vystavený priamym poveternostným vplyvom. Kvôli riziku vandalizmu sú tieto prvky v niektorých prípadoch maskované ako bežné dopravné značenie. Konštrukcia zabezpečuje pevné a opakovateľné uloženie pre dlhodobé pozorovanie.



Legenda:

- 1 – Skúšobný prvok
- 2 – Objímková päta stĺpa
- 3 – Kotviace skrutky M8
- 4 – Oceľová platňa $t = 8\text{mm}$
- 5 – Oceľový vrt $550 \times 60 \times 1,7\text{mm}$
- 6 – Betónová zálievka
- 7 – Pôvodná zemina

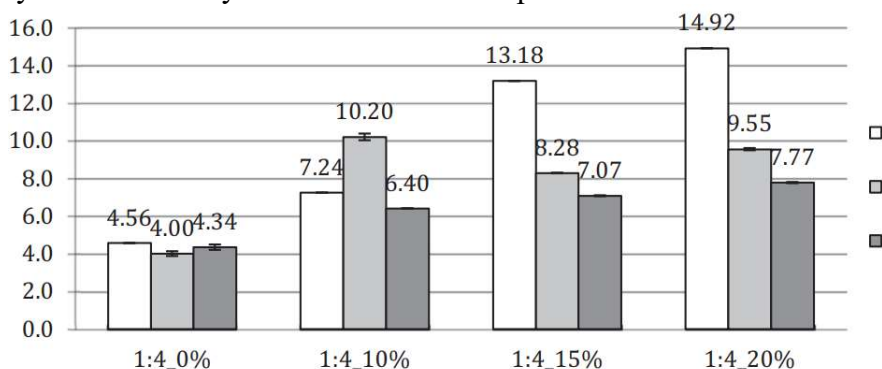
Obrázok 5: Skúšobný in-situ prvok pre meranie dynamickej odozvy [9]

Prvky majú rozmery $71 \times 71\text{ mm}$, výšku 400 mm (so zapustením 100 mm do oceľovej kapsy) a sú mechanicky fixované pomocou závitovej tyče k základni. Táto metóda zabezpečuje vysokú stabilitu a opakovateľnosť pri meraní dynamickej odozvy.

• Materiálové riešenie a urýchlenie degradácie

Cieľom návrhu simulačnej hmoty nebolo dosiahnuť vysokú životnosť, ale práve naopak – umožniť urýchlené starnutie materiálu. Bežne používané konštrukčné zmesi sa degradujú veľmi pomaly, preto bola navrhnutá kombinácia cementovej matrice s keramickým prachom a technickou penou.

Práce Farinhu a kol. [40] preukázali, že keramická drvina v malte vedie k poklesu pevnosti v tlaku už v priebehu niekoľkých dní. Malé častice keramiky vyplňajú priestor medzi zrnkami piesku, čo vedie k vytlačovaniu vody a vzniku mikrotrhlín počas sušenia.



Obrázok 6: Pokles pevnosti v tlaku malty s keramickou prímiesou v čase[40]

Pre ešte intenzívnejší degradačný efekt bola použitá kyselina fluorovodíková (HF), ktorá rozkladá kremičitú zložku keramiky. Tento prístup umožňuje simulovať dlhodobé chemické vplyvy, ktorým sú vystavené historické stavby v exteriérových podmienkach. Vzniknutý hybridný kompozit z cementu, keramiky a technickej peny vykazuje po ošetrení HF výraznú degradáciu pórovej štruktúry.

EXPERIMENTÁLNA ČASŤ – IN LABO

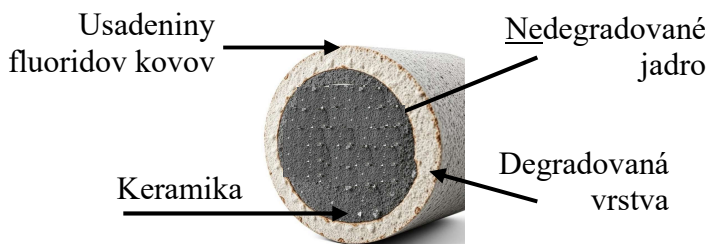
Ako už bolo konštatované v predošlých kapitolách, kombináciou rôznych materiálov je možné doceliť nový materiál, ktorý by predstavoval základ simulačného prvku pre zisťovanie mechanických a dynamických parametrov objektov, pri ktorých bude umiestnený a meraný.

Pre vyhotovenie tohto inovatívneho materiálu boli v práci použité zložky ako cement, sanitárna keramika, voda a dva rôzne typy napeňovadla.

Úvodná fáza výskumu bola zameraná na identifikáciu vhodného chemického činidla schopného efektívne degradovať keramické materiály, pričom som sa sústredil najmä na silikátové keramiky, ktorých značný podiel je možné nájsť aj v samotnom cemente.

Po dôkladnej analýze dostupnej literatúry a porovnaní rôznych variant sa ako najperspektívnejšia ukázala kyselina fluorovodíková (HF), ktorá sa vďaka svojej schopnosti selektívne rozpúšťať sklovitú maticu keramiky stala kľúčovým prvkom tohto výskumu.

Na základe zistení z predošlých kapitol je možné konštatovať, že v prípade vyhotovenia vzoriek na báze zmiešania polyuretánu, cementu, keramiky a vody, a ich následnej degradácii pomocou kyseliny fluorovodíkovej, dôjde k rozpadu komponentov cementu a keramiky v prvej fáze. Toto bude fáza, ktorá sa bude považovať za najdôležitejšiu. Je možné konštatovať, že po degradácii vo zvolených časoch bude možné dosiahnuť štruktúru vzorky v takomto rozložení

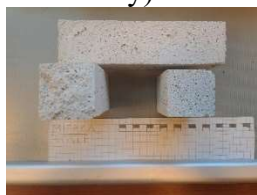


Obrázok 7: Predpoklad vizuálu degradovanej vzorky (AI generované) [9]

Pri miešaní rôznych zmesí bolo možné identifikovať niekoľko zásadných rozdielov, ktoré výrazne ovplyvňovali nielen samotný priebeh prípravy, ale aj výsledné vlastnosti zmesí, a z nich vyrobených materiálov. Tieto zmesi obsahovali rôzne kombinácie zložiek: cement (C), keramiku (K), vodu (V), pištoľovú penu (F („foam“)), polyol (P) a diizokyanát (D). Rozdiely sa prejavovali najmä v spôsobe zapracovania jednotlivých zložiek, požadovanej konzistencii počas miešania, a citlivosti niektorých komponentov (najmä penových zložiek) na intenzitu miešania.

Medzi najvýznamnejšie faktory ovplyvňujúce výslednú kvalitu zmesi a finálneho produktu patrili:

- Vzájomné pomery jednotlivých zložiek, najmä: V/F, V/(D+P), C/K, C/V, D/P.
- Dĺžka trvania fázy primiešavania a reakčného času peny v zmesi.
- Celkový čas miešania zmesi obsahujúcej penu.
- Spôsob primiešania D a P.
- Pomer celkového objemu formy ku objemu zmesi vo forme.
- Množstvo vody v zmesi.
- Teplota komponentov C, K, V (regulovaná teplotou pridávanej vody).



Obrázok 8: Receptúra R2 – K17,18; C19,93; V20,7; F28,52; w/w[%]

Spôsob miešania : K+C+V – pridávanie peny z pištole (F)[9]

Tabuľka 1: Zvolená receptúra pre degradačné procesy a mechanické skúšky

Názov	Keramika	Cement	Voda	Pišt. Pena	Polyol	Diisokyanid
	K (w/w)	C (w/w)	V (w/w)	F (w/w)	P (w/w)	D (w/w)
6 _{R19}	10,00%	50,00%	5,00%	0,00%	17,00%	18,00%

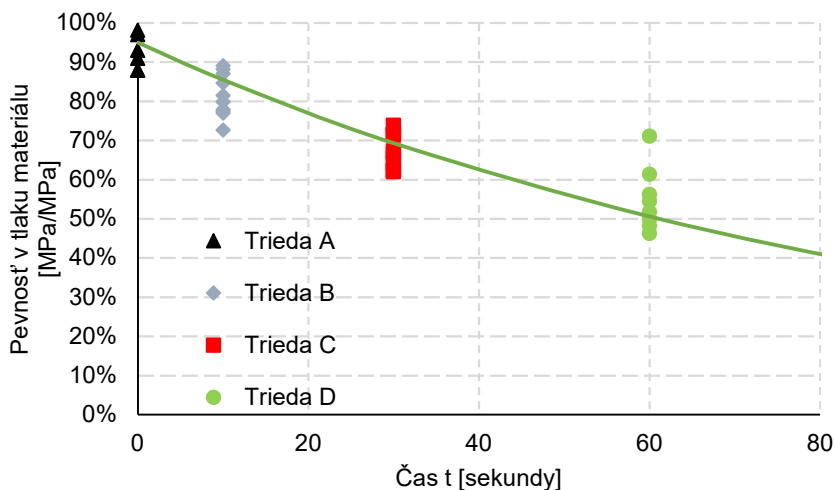
Táto receptúra vykazovala najkonzistentnejšie tvorenie pórov, čo je potrebné pre infiltráciu zmesi HF do hotového produktu – vzorky. Vykazovala vhodné parametre pri skúšaní mechanických vlastností po vyzretí. A taktiež bola účelovo optimalizovaná za účelom zjednodušenia tvorby rozsiahlejších množstiev, z hľadiska pomerov, ale aj z hľadiska rýchlosti reakcie.

V rámci degradácie boli vzorky rozdelené do 4 skupín:

- **Skupina A** – neovplyvnené (nedegradované) vzorky;
- **Skupina B** – vzorky vystavené 40 % roztoku HF po dobu 10 sekúnd;
- **Skupina C** – vzorky vystavené 40 % roztoku HF po dobu 30 sekúnd;
- **Skupina D** – vzorky vystavené 40 % roztoku HF po dobu 60 sekúnd.

V rámci zisťovania mechanických vlastností boli vyhotovené skúšky v jednoosovom tlaku a skúšky v štvorbodovom ohybe na vzorkách vo všetkých degradačných skupinách.

Ich poklesy pevnosti vzhľadom na degradáciu boli vyhodnotené a bola vytvorená degradačná krivka reprezentujúca degradáciu tohto materiálu v kyseline fluorovodíkovej (HF):

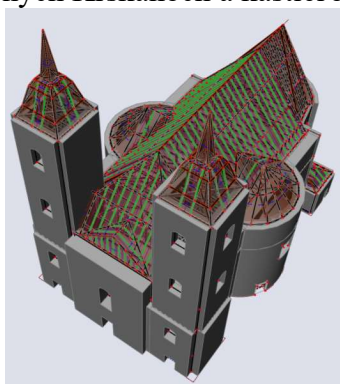


Obrázok 9: Degradačná krivka materiálu po expozícii kyseline fluorovodíkovej [9]

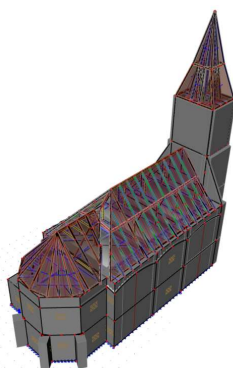
EXPERIMENTÁLNA ČASŤ – IN SITU

V rámci experimentálnych meraní in situ boli vybrané 4 historické stavby, na ktorých bola vyhotovená dynamická zaťažovacia skúška a boli experimentálne merané zrýchlenia na vopred stanovených bodoch pomocou vytvorených numerických výpočtových modelov, ktorých rozmery sú podložené skutovým zameraním vyhotoveným v rámci práce spoločne s obhliadkov objektov.

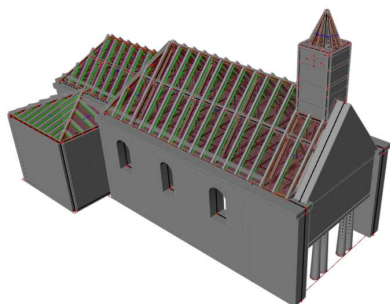
Práca sa zaoberá objektami kostolov vo Višňovom, Turčeku, Horných Krškanoch a kaštieľom v Hybe.



(a)



(b)



(c)

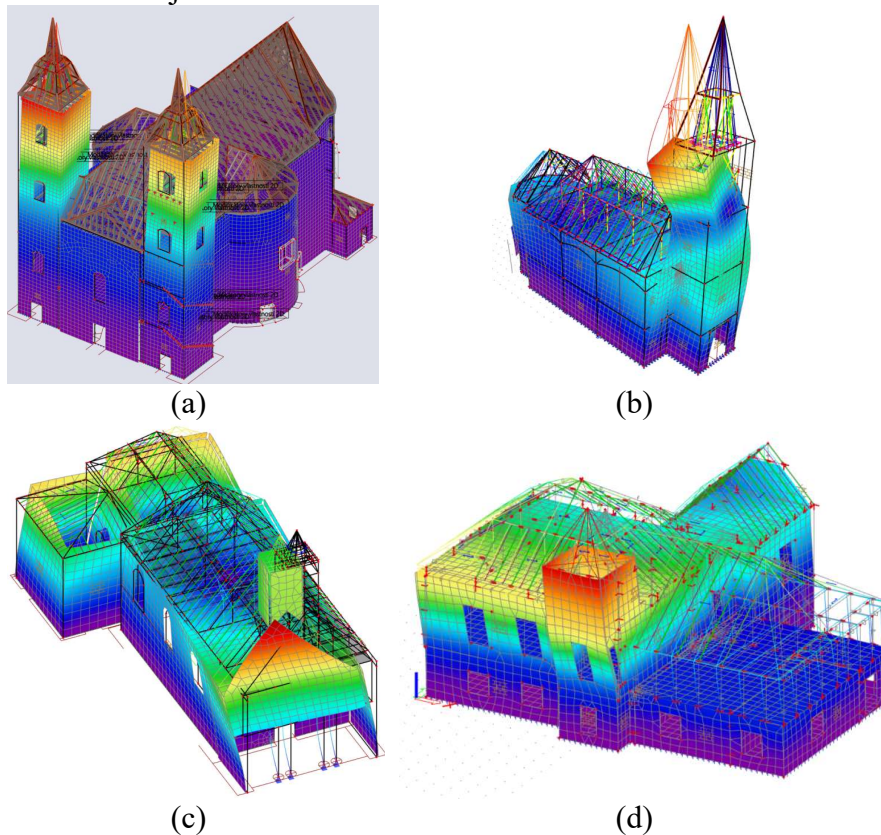


(d)

Obrázok 10: Axonometrie výpočtových modelov jednotlivých objektov (a) kostol vo Višňovom, (b) kostol v Turčeku, (c) kostol v Horných Krškanoch, (d) kaštieľ v Hybe

[9]

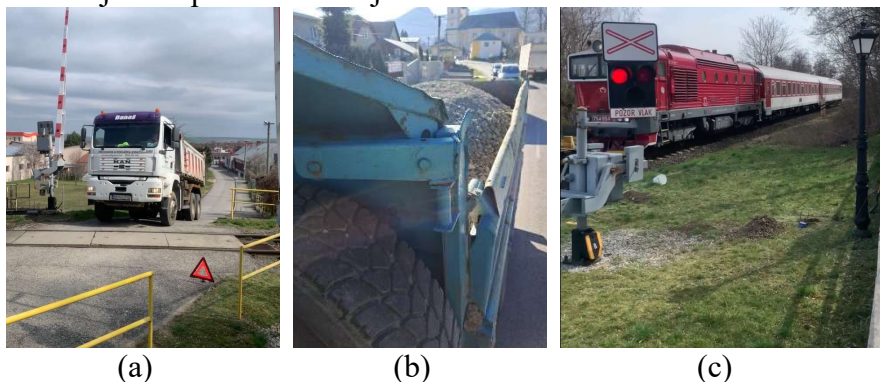
Na objektoch bola vyhotovená modálna analýza za účelom zistenia ich vlastných tvarov kmitania a vlastných frekvencií kmitania. Modeli boli neskôr doladzované vzhľadom na experimentálne namerané údaje.



Obrázok 11: Grafické vyobrazenie 1. tvaru kmitania (a) kostol vo Višňovom, (b) kostol v Turčoku, (c) kostol v Horných Kráľovciach, (d) kaštieľ v Hybe [9]

Na základe týchto údajov boli zvolené miesta pre umiestnenie snímačov na každom objekte a stanovené referenčné stanovisko pre meranie účinkov technickej seizmicity podľa STN EN 1998. Objekty boli zatriedené do tried, ktoré poukazujú na medznú hodnotu rýchlosti vibrácií. Na objektoch boli následne vyhotovené

experimentálne merania, pri ktorých sa simuloval prejazd ťažkých vozidiel alebo bola využitá aktuálna doprava. Všetky boli identifikované tak, že bol kladený dôraz na ich zaťaženie technickou seizmicitou. Preto sa objekt kostola v Turčeku a kaštieľ v Hybe nachádzajú pri ceste prvej triedy, objekt kostola v Horných Krškanoch sa nachádza v bezprostrednej blízkosti železničnej trate a kostol Višňové je objekt, ktorý je pravidelne zaťažovaný vibráciami spôsobenými ťažkou nákladnou dopravou v súvislosti s dlhodobo prebiehajúcimi prácami na objekte tunela Višňové.



Obrázok 12: Niektoré z použitých zaťažovacích vozidiel (a) Horné Krškany (b) Višňové, (c) Horné Krškany [9]

Počas meraní vplyvnu technickej seizmicity na zvolených objektoch bol súčasne meraný senzorický prvok, ktorý bol pri objekte umiestnený v dvoch degradačných skupinách. Merania z tohto prvku sú následne použité pre možné škálovanie degradačnej kryvky jednotlivých objektov.

Súčasne s meraniami prebehlo merania ISM, na zistenie rýchlosti šírenia vln v okolí skúmaných objektov.

Všetky objekty boli zaradené do tried podložia podľa STN EN 1998.

- Kostol sv. Mikuláša vo Višňovom – trieda B (370–400 m/s)
- Kostol sv. Jána Nepomuckého v Turčeku – trieda B (420 až 455 m/s)

- Kostol Narodenia Panny Márie v Horných Kráľovoch – trieda C (250 až 275 m/s)
- Kaštieľ – Vila Lanvich v Hybiach – trieda C (210 až 265 m/s)

Pre meranie zrýchlení boli použité vysokocitlivé snímače značky B&K, konkrétne BK DeltaTron 4508 B a BK 8340.

EXPERIMENTÁLNY IN-SITU PRVOK Z IM

Experimentálny prvok konzolového charakteru pre amplifikáciu nemarených signálov slúžil na určenie dynamických parametrov daných vzoriek v prostredí, kde sú všetky geologické subsystémy totožné s tými, ktoré sú v okolí meraného objektu. V práci je tiež označovaný ako senzorický prvok.

Tento prvok bol vyhotovený v dvoch totožných variantoch – jeden nedegradovaný, zaradený do skupiny A, a druhý degradovaný pôsobením HF počas 60 sekúnd, zaradený do skupiny D. Po ukončení experimentov boli na týchto prvkoch zisťované mechanické vlastnosti, ktoré zodpovedali ich zatriedeniu do uvedených skupín.



(a)



(b)

Obrázok 13: Senzorický prvok – detaily (a) rozobratý odliaty prvok po monolitizácii s pätkou (b) pätko so závitovou tyčou pred monolitizáciou prvku [9]



(a)



(b)



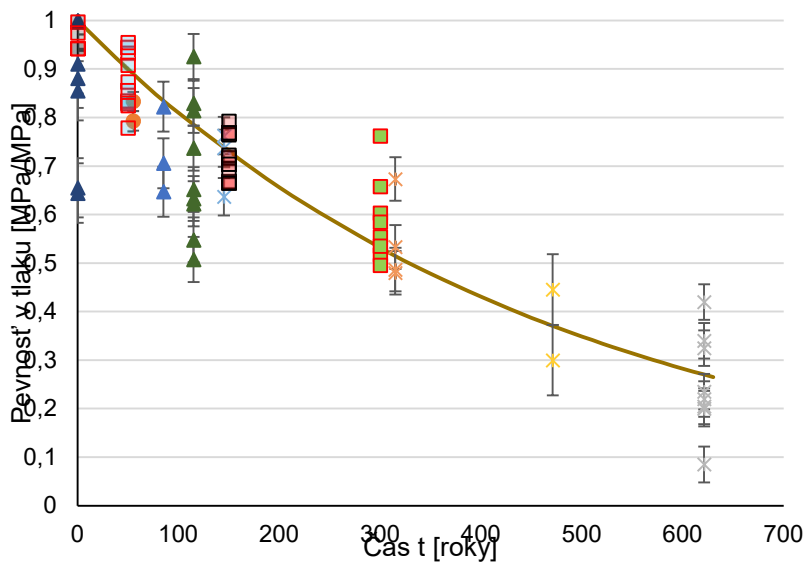
(c)



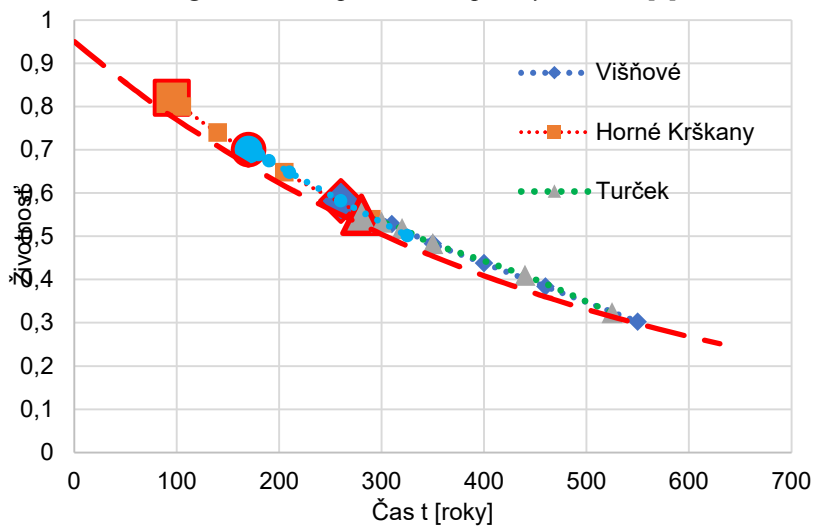
(d)

Obrázok 14: Rozmiestnenie senzorických prvkov pri skúmaných objektoch vo/v (a) Višňovom, (b) Turčeku, (c) Horných Krškanoch, (d) Hybe [9]

Takto použitý prvok spoločne s literatúrov bol použitý na naškádovanie pravdepodobnosti poruchy počas životnosti objektov.



Obrázok 15: Parametrizovaná teoretická krivka straty pevnosti vplyvom degradácie s rešpektom k empirickým dátam [9]



Obrázok 16: Degradácia krivka s vyznačeným aktuálnym vekom objektov, vzťahujúcim sa na pokles ich frekvencie spôsobený stratou pevnosti [9]

5 ZÁVER

Dizertačná práca sa zamerala na analýzu účinkov technickej seizmicity na historické objekty. Skúmané boli štyri stavby – kostoly vo Višňovom, Turčeku, Horných Krškanoch a kaštieľ v Hybiach – nachádzajúce sa v blízkosti významných dopravných trás. Lokality boli zatriedené do tried podložia podľa STN EN 1998 na základe rýchlosti šírenia seizmických vln. Na objektoch boli realizované in-situ merania zamerané na sledovanie dynamickej odozvy konštrukcií pri prejazde vozidiel. Výsledky boli analyzované v časovej aj frekvenčnej oblasti a porovnané s medznými hodnotami podľa STN EN 1998-1/NA/Z1. Kým objekty v Turčeku a Hybiach dosiahli hodnoty hlboko pod limitom, vo Višňovom boli namerané hodnoty na úrovni 74 % a v Horných Krškanoch došlo k jeho prekročeniu pri starších vlakových súpravách. Na základe týchto údajov boli odporúčané preventívne opatrenia a opakované merania. Pre všetky objekty boli vytvorené numerické modely založené na metóde konečných prvkov, ktoré slúžili na identifikáciu najcitlivejších častí a simuláciu hypotetických scenárov degradácie. Súčasťou výskumu bol aj vývoj monitorovacieho prvku z inovatívneho kompozitu (cement, polyuretán, keramika), ktorý bol vystavený urýchlenej chemickej degradácii pomocou HF. V laboratórnych podmienkach boli sledované mechanické parametre, z ktorých bola zostavená parametrizovaná degradačná krivka. Prvok dosiahol úroveň TRL 3 a má potenciál slúžiť ako senzorický indikátor degradácie v dlhodobom monitoringu. Výsledky práce potvrdzujú potrebu pravidelného merania vibrácií na historických objektoch a ich zatriedenia podľa miery degradácie. Len tak je možné včas identifikovať potrebu zásahu a prispieť k ochrane kultúrneho dedičstva.

SUMMARY

The dissertation focused on the analysis of the effects of technical seismicity on historical structures. Four case studies were examined – churches in Višňové, Turček, and Horné Krškany, and the Lanvich Manor House in Hybe – all located near major transport routes. The sites were classified into subsoil categories according to EC 1998 based on the measured wave propagation velocities.

In-situ dynamic measurements were carried out on all objects to monitor their structural response to traffic-induced vibrations. The recorded data were analyzed in both time and frequency domains and compared with the limit values defined in STN EN 1998-1/NA/Z1. While the buildings in Turček and Hybe remained well below the normative limits, Višňové reached 74 % of the threshold, and Horné Krškany exceeded it during the passage of older train sets. Preventive measures and follow-up monitoring were recommended accordingly. Finite element models were developed for each structure, enabling identification of the most sensitive components and simulation of hypothetical degradation scenarios.

A key part of the research was the development of an innovative monitoring element made of a composite material (cement, polyurethane, and ceramic additive), which was exposed to accelerated degradation using hydrofluoric acid (HF). Mechanical parameters such as compressive strength, tensile strength, and modulus of elasticity were monitored, and a parameterized degradation curve was derived from the results. The material reached TRL 3 and shows potential as a sensor-based indicator for long-term monitoring of structural degradation.

The findings confirm the importance of regular vibration monitoring of historical buildings and their classification based on the degree of degradation. This is essential for early intervention and the preservation of cultural heritage.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] WITZANY, J. ZIGLER, R., URUSHADZE, S., „Experimental research into the response of a monumental historic structure to traffic-induced effects of technical seismicity,“ *The civil engineering journal*, %1. vyd.4, pp. 482-489, 2019.
- [2] R. BERNHARD, Geophysical study of soil parameters, American Institute of Research, 1937.
- [3] WITZANY, J., ZIGLER, R., ČEJKA, T., KUBÁT, J., „Complex static and dynamic protection of historic building from the effects of technical seismicity,“ *The civil engineering*, %1. vyd.3, pp. 435-444, 2019.
- [4] Cheng Zhang, Nan Zhang, Yunshi Zhang, Xiao Liu, „Prediction of Traffic Vibration Environment of Ancient Wooden Structures Based on the Response Transfer Ratio Function,“ *Sensors*, %1. vyd.22, 2022.
- [5] Guanfeng Qiao, Tieying Li, Y. Frank Chen, „Assessment and retrofitting solutions for an historical wooden pavilion in China,“ *Construction and Building Materials*, %1. vyd.105, pp. 435-447, 2016.
- [6] M. D. Jalovick, Artist, *Night photograph of the Xi'an Bell tower in '13*. [Art]. CC BY-SA 4.0, 2013.
- [7] Meng Ma, Weining Liu, Chunyu Qian, Guohua Deng, Yudong Li, „Study of the train-induced vibration impact on a historic Bell Tower above two spatially overlapping metro lines,“ *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, %1. vyd.81, pp. 58-74, 2016.
- [8] PAPÁN, D., PAPÁNOVA, Z., VALAŠKOVÁ, V., „Possibilities for the innovative IT database technology utilisation for the traffic induced seismicity affecting historical buildings in Slovenia,“ *International Journal of Science and Research Publication*, pp. 658-662, 2019.
- [9] I. D. Ďugel, Artist, *Galéria autora*. [Art]. UNIZA, 20232-2025.
- [10] P. MARTON, Dynamika stavebných konštrukcií, Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2008.
- [11] E. JUHÁSOVÁ, Pôsobenie seizmických pohybov na stavebné konštrukcie, Bratislava: Veda - vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1985.
- [12] D. PAPÁN, Experimentálne meranie účinkov technickej seizmicity vyvolávanej dopravou, Žilina: Žilinská Univerzita - Habilitačná práca, 2021.
- [13] KOUROUSSIS, G., VERLINDEN, O., CONTI, C., „Ground propagation of vibrations from railway vehicles using a finite/infinite-element model of the soil,“ *Proceedings of the IMechE, Part F: Journal of the Rail and Rapid Transit*, %1. vyd.223(F4), pp. 403-413, 2009.
- [14] DECKÝ, M., LEITNER, B., PAPÁN, D., Objektivizácia interakčných subsistémov a bezpečnostných rizík dynamickej sústavy vozidlo - vozovka - horninové prostredie, Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina v edičnom rade VEDECKÉ MONOGRAFIE, 2017.
- [15] DING, L., HAO, H., ZHU, X., „Evaluation of dynamic vehicle axle loads on bridges with different surface conditions,“ *J Sound Vib*, %1. vyd.323, pp. 826-848, 2009.
- [16] NEFOVSKA-DANILOVIC M., PETRONIJEVIC M., SAVIJA B., „Traffic-induced vibrations of frame structures,“ *Canadian Journal of Civil Engineering*, zv. II, %1. vyd.40, pp. 158-171, 2013.
- [17] Zi-Yu Taa, Chao Zou, Guang-Rui Yang, Yi-Min Wang, „A semi-analytical method for predicting train-induced vibrations considering train-track-soil and soil-pile-building dynamic interactions,“ *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, %1. vyd.167, 2023.

- [18] DENG, L., CAI, CS., „Development of dynamic impact factor for performance evaluation of existing multi-girder concrete bridge,“ *End Struct*, pp. 21-32, 2010.
- [19] J. S. S. KLUSÁK, „Very high cycle fatigue tests of high strength steels S355 J0 and S355 J2,“ *Procedia Structural Integrity*, %1. vyd.17, pp. 576-581, 2019.
- [20] BATTISTA, R., PFEIL, MS., CARVALHO, EML., „Vehicle-structure interaction effect on the fatigue life of steel orthotropic decks,“ *8th International conference on structural dynamics, EURODDYN*, 2011.
- [21] AKIYAMA, H., FUKANDA, S., KAJIKAWA, Y., „Numerical study of vibrational serviceability of flexible single span bridge with different structural system under traffic load,“ *Struct Eng Int*, zv. 3, pp. 256-263, 2007.
- [22] CHEN, S., CAI, C., LEVITAN, M., „Understand and improve dynamic performance of transportation system Ga Case study of Luling Bridge,“ *Eng Struct*, pp. 1041-1051, 2007.
- [23] LAW, S., LI, J., „Updating the reliability of a concrete bridge structure based on condition assessment with uncertainties,“ *Eng Struct*, pp. 286-296, 2010.
- [24] LUDESCHER, H., BRÜHWILER, E., „Dynamic amplification of traffic loads on road bridges,“ *Struct Eng Int*, %1. vyd.19, pp. 190-197, 2009.
- [25] YIN, X., FANG, Z., CAI, CS., DENG, L., „Non-stationary random vibration of bridges under vehicles with variable speed,“ *Eng Struct*, %1. vyd.32, pp. 2166-2174, 2010.
- [26] HENCHI, K., FAFARD, M., TALBOT, M., DHATT, G., „An efficient algorithm for dynamic analysis of bridges under moving vehicles using a coupled modal and physical components approach,“ *J Sound Vib*, %1. vyd.212(4), pp. 663-83, 1998.
- [27] NEVES, SGM., AZEVEDO AFM., CALADAR, R., „A direct method for analyzing the vertical vehicle-structure interaction,“ *Eng Struct*, %1. vyd.34, pp. 414-420, 2012.
- [28] OLIVIA, J., GOICOLEA, J.M., ANTOLÍN, P., ASTIZ, Á.A., „Relevance of a complete road surface description in vehicle-bridge,“ *Engineering Structures*, %1. vyd.56, pp. 466-476, 2013.
- [29] KOUROUSSIS, G., VERLINDEN, O., CONTI, C., „Free field vibrations caused by high-speed lines: Measurement and time domain simulation,“ *Soil Dynamics and Earthquake engineering*, %1. vyd.31, pp. 692-707, 2011.
- [30] LYSMER, J., KUHLEMEYER, RL., „Finite dynamic model for infinite media,“ *Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the ASCE*, %1. vyd.95(EM4), pp. 859-877, 1969.
- [31] KOUROUSSIS, G., VERLINDEN, O., CONTI, C., „Efficiency of the viscous boundary for time domain simulation of railway ground vibration,“ *17th international congress on sound and vibration*, %1. vyd.(ICSV17), 2010.
- [32] KOUROUSSIS, G., VERLINDEN, O., CONTI, C., „On the interest of integrating vehicle dynamics for the ground propagation of vibrations: the case of urban railway traffic,“ *Vehicle System Dynamics*, %1. vyd.48(12), pp. 1553-1571, 2010.
- [33] KOUROUSSIS, G., VERLINDEN, O., CONTI, C., „On the infinite element modelling of soil for the prediction of railway vibrations,“ *3rd international congress design and modelling of mechanical systems*, 2009.
- [34] V. KRYLOV, „Vibrational impact of high-speed trains, effect of track dynamics,“ *Journal of Acoustical Society of America*, %1. vyd.100(5), pp. 3121-34, 1996.

- [35] GALVÍN, P., DOMÍNGUEZ, J., „Experimental and numerical analyses of vibrations induced by high-speed trains on the Co'rdoba-Ma'laga line,“ *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, %1. vyd.29, pp. 641-651, 2009.
- [36] KOGUT, J., a kol., „High speed train induced vibrations: in situ measurements and numerical modelling,“ *10th international congress on sound and vibration*, %1. vyd.247(1), pp. 131-144, 2001.
- [37] A. JOHN, Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual, Washington, DC: US Department of Transportation, 2018.
- [38] SAURENMAN, H. J., NELSON, J.T., WILSON, G.P., Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control: Executive Digest, Washington DC: US Department of Transport, 1982.
- [39] Yit-Jin Chen, Shen-Haw Ju, Sheng-Huo Ni, Yi-Jiun Shen, „Prediction methodology for ground vibration induced by passing trains on bridge structures,“ *Journal of Sound and Vibration*, %1. vyd.302, pp. 806-820, 2007.
- [40] FARINHA, C., de BRITO, J., VEIGA, R., „Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars,“ *Construction and Building Material*, zv. 8, pp. 194-206, 2015.
- [41] F. a. k. de ANDRADE, „A novel TiO₂/autoclaved cellular concrete composite: From a precast building material to a new floating photocatalyst for degradation of organic water contaminants,“ *Journal of Water Process Engineering*, %1. vyd.7, pp. 27-35, 2015.
- [42] H. B. & Kjær, „Brüel & Kjær an HBK company,“ Brüel & Kjær, [Online]. Available: www.bksv.com. [Cit. 11 09 2023].
- [43] P. D. GmbH, „www.pce-instruments.com,“ PCE-instruments, 2023. [Online]. Available: www.pce-instruments.com. [Cit. 11 09 2023].
- [44] M. MORAVČÍK, Mechanika Železničných tratí - 3. diel, Experimentálna analýza namáhania a pretvorenia komponentov trate, Žilina: EDIS - Žilinská Univerzita, 2002, p. 220.
- [45] D. Ďugel, Podrobná numerická a experimentálna analýza moderného kompozitu pri použití neštandardnej ohybovej skúšky, Diplomová práca, Žilina: EDIS, 2022.
- [46] J. KRÁLIK, Modelovanie konštrukcií v metóde konečných prvkov, Systém ANSYS, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave - Stavebná fakulta, 2009.
- [47] MURÍN, J. HRABOVSKÝ, J. KUTIŠ, V., Metóda konečných prvkov - Vybrané kapitoly pre mechatronikov, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014.
- [48] MICHLIN, S. G., SMOLICKIJ, C.L., Približné metódy riešenia diferenciálnych a integrálnych rovníc, preklad., Bratislava: Vydavateľstvo Alfa, 1974.
- [49] A. KNESCHKE, Používanie diferenciálnych rovníc v praxi, preklad, Bratislava: Nakladateľstvo Alfa, 1969.
- [50] MELCER, J. a kol., Dynamika dopravných stavieb, Žilina: EDIS - vydavateľstvo Žilinskej univerzity, 2016.
- [51] Benčat J., Papán D., „Soil Dynamic Parameters Determination by Waves Spectral and Correlation Analysis,“ *Procedia Engineering*, zv. 190, pp. 334-344, 2017.
- [52] Yang J., Thompson D. J., „Time-domain prediction of impact noise from wheel flats based on measured profiles,“ *Journal of Sound and Vibration*, zv. 333, %1. vyd.17, pp. 3981-3995, 2014.
- [53] Oppenheim, A.V., Schaffer, R.W., Discrete-Time Signal Processing. 3rd edition, England: Pearson, 2010.

- [54] A. A. D. D. M. J. V. P. Ramakrishnaiah R., „The Effect of Hydrofluoric Acid Etching Duration on the Surface Micromorphology, Roughness, and Wettability of Dental Ceramics,“ *International Journal of Molecular Science*, zv. 17, pp. 882-17, Máj 2016.
- [55] S. Yanakiev, B. Yordanov, M. Marinova-Takorova, „HYDROFLUORIC ACID ETCHING PATTERNS AND SURFACE MORPHOLOGY OF THREE SILICA-BASED CERAMIC MATERIALS,“ *Journal of IMAB - Annual Proceeding*, zv. 28, pp. 4325-4329, 2022.
- [56] A. Król, Z. Giergiczny, J. Kuterasińska-Warwas, „Properties of Concrete Made with Low-Emission Cements CEM II/C-M and CEM VI,“ *Materials*, zv. 13, %1. vyd.10, p. 2257, 2020.
- [57] D.V. Ulrikh, M. Butakova, „Soil-cement of Normal Hardening on the Basis of the Argillaceous Raw Material and Copper Ore Processing of Waste in Eco-geology and Construction,“ *Procedia Engineering*, zv. 150, pp. 1510-1515, 2016.
- [58] R. Ropp, *Encyclopedia of the Alkaline Earth Compounds*, Elsevier, 2013.
- [59] Shimizu, K. and Cramb, A.W., „Fluoride Evaporation from $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2\text{-CaO}$ Slags and Mold Fluxes in Dry and Humid Atmospheres,“ *High Temperature Materials and Processes*, zv. 22, %1. vyd.5-6, pp. 237-246, 2003.
- [60] Liu, Y., Wang, Y., Li, G. et al., „Investigation on the structure, fluoride vaporization and crystallization behavior of $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-(SiO}_2\text{)}$ slag for electros slag remelting,“ *J Therm Anal Calorim*, zv. 139, pp. 923-931, 2020.
- [61] D. L. Perry, *Handbook of Inorganic Compounds*, Boca Raton: CRC Press, 2011, p. 581.
- [62] K. SCHIMIZU, A.W. Cramb, „Fluoride Evaporation from $\text{CaF}_2\text{-SiO}_2\text{-CaO}$ Slags and Mold Fluxes in Dry and Humid Atmospheres,“ *High Temperature Materials and Processes*, zv. 22, %1. vyd.5-6, pp. 237-246, 2011.
- [63] Nik Khairul Irfan Bin Nik Ab. Lah., Sonny Irawan, „Slagment Cement Improve the Cement Resistance Toward Acids Attack During Acidizing Treatment,“ *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, zv. 5, %1. vyd.21, pp. 4961-4966, 2013.
- [64] Knapen, E., Snellings, R., Van Gemert, D., & Verhaegen, B., „Degradation of hardened cement paste by hydrochloric acid attack,“ *Cement and Concrete Research*, zv. 39, %1. vyd.6, pp. 528-538, 2009.
- [65] M. Brodňan, a kol., *Stavebné materiály návody na cvičenia*, Žilina: Edis, 2015.
- [66] BLAIFI, H. a kol., „Sustainable use of recycled plastic and ceramic industrial waste in eco-friendly construction materials,“ *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, zv. 22, %1. vyd.8, p. 1471, 2023.
- [67] F. a. k. ANDREOLA, „Recycling of industrial wastes in ceramic manufacturing: State of art and glass case studies,“ *Ceramics International*, zv. 42, %1. vyd.12, pp. 13333-13338, 2016.
- [68] W. WUNDERLICH, *Ceramic Materials*, 510 00 Rijeka, Croatia: InTech, 2010.
- [69] S. Parveen, S. Jahan, „Investigation on Physico-Chemical Properties of Vitreous China Sanitary Ware from Local Clays,“ *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, zv. 45, %1. vyd.4, pp. 287-392, 2010.
- [70] S. N. Almohammed, B. Alshorman, L. A. Abu-Naba'a, „Mechanical Properties of Five Esthetic Ceramic Materials Used for Monolithic Restorations: A Comparative In Vitro Study,“ *Ceramics*, zv. 6, %1. vyd.2, pp. 1031-1049, 2023.
- [71] J. B. WACHTMAN, W. R. CANNON, M. J. MATTHEWSON, *Mechanical properties of ceramics*, Second edition, John Wiley & Sons, Inc., 2009.

- [72] ChemicalBook, „Poly(propylene glycol),“ 01 03 2024. [Online]. Available: https://amp.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB4123367.htm?N=Europe. [Cit. 2025].
- [73] Doxuchem, „Doxuchem,“ 8 11 2023. [Online]. Available: [Online] Dostupné : <https://doxuchem.com/polyurethane-formulation-the-chemistry-of-isocyanate-and-polyols/>. [Cit. 2025].
- [74] Juli Li; Feng Wu; Huaifeng Guo; Yingquan Li, „Study on the Design of an Adjustable Foaming Machine,“ *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, zv. 8, pp. 881-883, 2015.
- [75] Caiyuan Lu, Yuxin Wu, Di Zhu, Yuntao Liang, „Study on the foam production characteristics of air self-suction foam generator by jet,“ *Sci Rep*, zv. 15, p. 668, 2025.
- [76] C.N. Kaushik, M.V. Achutha, K.R. Prakash, „Design and Development of Automation System for Polyurethane,“ *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*, zv. 2, %1. vyd.6, pp. 33-41, 2015.
- [77] R. Ghoreishia, G. J. Suppesa, „Chain Growth Polymerization Mechanism in PolyurethaneForming Reactions,“ *The Royal Society of Chemistry*, %1. vyd.84, pp. 1-8, 2015.
- [78] Mengyuan Pu. a kol., „Recent Advances in Environment-Friendly Polyurethanes from Polyols Recovered from the Recycling and Renewable Resources: A Review,“ *Polymers*, zv. 13, %1. vyd.16, pp. 1889-1922, 2024.
- [79] K. Scientific, „krackeler,“ Krackeler Scientific, 2013-2025. [Online]. Available: <https://www.krackeler.com/catalog/sigma/SIAL/33428>. [Cit. 2025].
- [80] K. a. k. HIRAI, „PROCESS FOR PRODUCING POLYURETHANE“. Patent PCT/JP87/00042 , 22 01 1987.
- [81] Yupeng Li, Yong Jin, Wuhou Fan, Rong Zhou, „A review on room-temperature self-healing polyurethane: synthesis, self-healing mechanism and application,“ *Journal of Leather Science and Engineering*, zv. 4, %1. vyd.24, pp. 1-22, 2022.
- [82] S. O. D. P. M.A.L. Kelly, „Physical Properties of MDI and TDI,“ International Isocyanate Institute, Inc., III Report Reference Number 11272, 1997.
- [83] ChemSrc, „poly(propylene glycol),“ 02 01 2024. [Online]. Available: https://www.chemsrc.com/en/cas/25791-96-2_3012.html. [Cit. 2025].
- [84] I. UltraTech International, „Chemical Compatibility Guide - Polyurethane,“ UltraTech International, Inc..
- [85] SpillTech Sales & Marketing, „Chemical Compatibility Guide For Polyurethane Items,“ SpillTech Manufacturing, Alpharetta.
- [86] L. Verdolotti E. Di Maio M. Lavorgna S. Iannace L. Nicolais, „Polyurethane–Cement-Based Foams: Characterization and Potential Uses,“ *Journal of Applied Polymer Science*, zv. 107, pp. 1-8, 2006.
- [87] M. Gökçe, „Foam Concrete,“ *Journal of New Results in Science (JNRS)*, zv. 9, %1. vyd.1, pp. 9-18, 2020.
- [88] I. Hubynets, SIMULOVANIE DEGRADÁCIE MATERIÁLU NA MALOROZMEROVÝCH VZORKÁCH ZA VYUŽITIA AGRESÍVNEHO CHEMICKÉHO PROSTREDIA, Žilina: KSMAM UNIZA - ŠVOČ, 2025.
- [89] D. Z. Yankelevsky, „The uniaxial compressive strenght of concrete: revisited,“ *Materials and Structures*, zv. 57, %1. vyd.144, 2024.

- [90] Bc. Filip Durčák, Polymérne materiály v dopravnom staviteľstve - meranie útlmových vlastností v dynamickom režime zaťaženia, Žilina: KSMAM - Edis, 2025.
- [91] Wu Yongmei, Chai Shaoqiang, Chen Yong, Zou Songzhe, Chai Lianzeng, „Experimental study on deterioration characteristics of foamed concrete under dry-wet cycles in acidic environment,“ *Frontiers in Materials*, zv. 10, 2024.
- [92] Chen, Weizhong & Tian, H.-M & Yuan, Jingqiang & Tan, Jun, „Degradation characteristics of foamed concrete with lightweight aggregate and polypropylene fibre under freeze–thaw cycles,“ *Magazine of Concrete Research*, zv. 65, pp. 720-730, 2013.
- [93] M. M. Al-Zaharani, „Durability of concrete-embedded GFRP bars after 20 years of tidal zone exposure: Correlation with accelerated aging tests,“ *Case Studies in Construction Materials*, zv. 21, 2024.
- [94] Aishwarya Lakshmi a kol., „Study on bond behaviour of corroded reinforced concrete beam – finite element analysis,“ *Cogent Engineering*, zv. 11, pp. 1-17, 2024.
- [95] A. Kutlák, DYNAMICKÉ PARAMETRE HISTORICKEJ BUDOVY A ICH ZISŤOVANIE EXPERIMENTÁLNYMI MERANIAM, Žilina: KSMAM UNIZA - ŠVOČ, 2025.
- [96] Ž. ŠUŠOLIAKOVÁ, Kostol sv. Mikuláša Višňové, Žilina: Vydavateľstvo Alfa a Omega, s. r. o. v spolupráci s RKFÚ Višňové, 2018.
- [97] a. Seznam.cz, „Mpay CZ,“ 1996-2023. [Online]. Available: <https://sk.mapy.cz/>. [Cit. 18 02 2023].
- [98] ÚGKKSR, Slovenská republika, GKÚ, EÚ, „MAPKA,“ ÚGKKSR, [Online]. Available: <https://zbgis.skgeodesy.sk/>. [Cit. 2025].
- [99] RNDr. Ružena RYBÁRIKOVÁ, „Záverečná správa geologickej úlohy - Evidenčné číslo geofondu 623/08,“ Geofond, Bratislava, 2008.
- [100] progeo spol.s r.o., „VIŠŇOVÉ – IBV PODVRŠIE, SO 01 PRÍSTUPOVÁ KOMUNIKÁCIA, vsakovanie dažďových vôd,“ Geofond, Bratislava, 2015.
- [101] Obec Turček, „Historické fotografie obce Turček,“ Obec Turček, 2012. [Online]. Available: Dostupné [Online] na https://www.obecturcek.sk/o-nas/photogallerycbm_484640/8/#!. [Cit. 2025].
- [102] Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, „Geology.sk,“ [Online]. Available: dostupné [Online] www.geology.sk. [Cit. 2025].
- [103] Štefan Hudec-GEOVRTY, „ZÁVEREČNÁ SPRÁVA geologickej úlohy - I/65 - Turček - odstránenie havarijného stavu,“ Geofond, Bratislava, 2020.
- [104] R. c. a. kol., „Farnosť Dolné Krškany,“ Rímskokatolícka cirkev, [Online]. Available: https://dolnekrskany.fara.sk/kostol_horne_krskany. [Cit. 04 2023].
- [105] WITZANY, J., ZIGLER, R., ČEJKA, T., KUBÁT, J., „COMPLEX STATIC AND DYNAMIC PROTECTION OF HISTORIC,“ *THE CIVIL ENGINEERING JOURNAL*, %1. vyd.35, pp. 435-444, 3-2019.
- [106] Google street view, Google.
- [107] G. Vassová, „Evidenčný list vrtu 56652 vrátane správy,“ Geofond, Bratislava, 1984.
- [108] GEOspo.sr.o., „Záverečná správa inžiniersko-geologického prieskumu - 01GEO2023,“ ALL PEOPLEs.r.o., Horné Krškany, 2023.
- [109] G. -. Markúsek, „Evidenčný list vrtu 26080,“ Geofond, Bratislava, 1971.
- [110] Mgr. Michal Gabčan, „Záverečná správa geologickej úlohy „IBV Hybe – Peňažné“,“ Geofond - Štefan Hudec – GEOVRTY, Belá, 2020.

- [111] Mgr. Oľga Pospiechová a kol., „Skvalitnenie účelovej monitorovacej siete VÚVH na sledovanie znečistenia v podzemných vodách – Západné Slovensko,“ Výskumný ústav vodného hospodárstva, Bratislava, 2021.
- [112] RNDr. V. Salagová, p.g. I. Salaga, „Mezozoikum Nízkych Tatier – SV časť: Vyhľadávaci hydrogeologický prieskum s ocenením zásob podzemných vôd,“ Geofond - IGHP n.p. Žilina, závod Žilina, Žilina, 1985.
- [113] Samuel Cibula, Vyšetrenie príčin porúch stavby s predpokladom ich vzniku v dôsledku vplyvov technickej seizmicity, Žilina: Edis, 2023.
- [114] Piotr Matyssek & Michal Witkowski, „A Comparative Study on the Compressive Strength of Bricks from Different Historical Periods,“ *International Journal of Architectural Heritage*, 2015.
- [115] Mammoliti E. a kol., „Defining a Non-Destructive In Situ Approach for the Determination of Historical Mortar Strength Using the Equotip Hardness Tester,“ *applied sciences*, zv. 11, %1. vyd.11, p. 4788, 2021.
- [116] Almeida L., a kol., „20th Century Mortars: Physical and Mechanical Properties from Awarded Buildings in Lisbon (Portugal)—Studies towards Their Conservation and Repair,“ *buildings*, zv. 13, %1. vyd.10, p. 2468, 2023.
- [117] Ucer D., a kol., „Analysis on the mechanical properties of historical brick masonry after machinery demolition,“ *Construction and Building Materials*, zv. 161, %1. vyd.10, pp. 186-195, 2018.
- [118] Boffill Y., a kol., „Assessment of historic brickwork under compression and comparison with available equations,“ *Construction and Building Materials*, zv. 207, pp. 258-272, 2019.
- [119] Kan Zhou, Han-Mei Chen, Yong Wang, Dennis Lam, Atta Ajayebi, Peter Hopkinson., „Developing advanced techniques to reclaim existing end of service life (EoS) bricks – An assessment of reuse technical viability,“ *Developments in the Built Environment*, zv. 2, %1. vyd.100006, 2020.
- [120] Turchetti, F., Cuca, B., Oreni, D., & Agapiou, A., „Recording of Historic Buildings and Monuments for FEA: Current Practices and Future Directions,“ *Heritage*, zv. 8, %1. vyd.2, p. 55, 2025.
- [121] Kotlyar, V., Pishchulina, V., Beskopylny, A. N., Meskhi, B., Popov, Y., & Efremenko, I., „Estimation of the Age of Architectural Heritage Objects by Microstructural Changes of Calcite in Lime Mortars of Ancient Brickwork and Masonry,“ *Buildings*, zv. 11, %1. vyd.6, p. 240, 2021.
- [122] SOKOL, M., TVRDÁ, K., Dynamika stavebných konštrukcií, Bratislava: STU v Bratislave, 2011.
- [123] DECKÝ, M. a kol., Mechanika vozoviek pozemných komunikácií, Žilina: Žilinská univerzita v Žiline EDIS - vydavateľstvo Žilinskej univerzity, 2014.
- [124] Z. ŠKODOVÁ, Praktický úvod do metodológie výskumnej práce, Martin: Univerzita Komenského v Bratislave, 2013.
- [125] GeoGebra, „GeoGebra,“ 23 04 2022. [Online]. Available: <https://www.geogebra.org/>. [Cit. 23 04 2022].
- [126] I. Hubynets, Simulovanie degradácie materiálu na malorozmerových vzorkách za využitia agresívneho chemického prostredia, Žilina: KSMAM, 2025.
- [127] Papán D., Decký M., Ďugel D., Durčák F., „Identification of Hybrid Polymer Material STERED and Basic Material Properties Used in Road Substructures or Pavements,“ *polymers*, zv. 16, %1. vyd.5, pp. 663-682, 2024.

PUBLIKOVANÉ ČLÁNKY

- **Papán, D., Decký, M., Ďugel, D., & Durčák, F.** (2024). Identification of Hybrid Polymer Material STERED and Basic Material Properties Used in Road Substructures or Pavements. *Polymers*, **16**(5), 663. <https://doi.org/10.3390/polym16050663>
- **Papán, D., Ďugel, D., Papánová, Z., & Ščotka, M.** (2022). Polymer Foam Concrete FC500 Material Behavior and Its Interaction in a Composite Structure with Standard Cement Concrete Using Small Scale Tests. *Polymers*, **14**(18), 3786. <https://doi.org/10.3390/polym14183786>
- **Figuli, L., Ďugel, D., & Papan, D.** (2023). Step for digital twins of bridges based on the original project drawings. *Transportation Research Procedia*, **74**(1), 1532–1537. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.132>
- **Ďugel, D., & Lapašová, L.** (2024). Selected Modern Materials in Transport Construction. (Výskumný ústav – University of Žilina).