



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Stavebná fakulta

**Meno a priezvisko:**

Ing. Katarína Lamperová

**Autoreferát dizertačnej práce:**

**Dynamické merania a systémová identifikácia mostov  
s využitím interferometrického radaru**

**na získanie akademického titulu:** philosophiae doctor – PhD.

**v doktorandskom študijnom programe:** aplikovaná mechanika

**v študijnom odbore:** strojárstvo

**forma štúdia:** denná

**Miesto a dátum:** Bratislava, 31.5.2020

**Dizertačná práca bola vypracovaná na:**

Katedre stavebnej mechaniky, Stavebnej fakulty STU v Bratislave

**Predkladateľ:**

*Ing. Katarína Lamperová*  
Katedra stavebnej mechaniky  
Stavebná fakulta, STU v Bratislave  
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

**Školiteľ:**

*prof. Ing. Milan Sokol, PhD.*  
Katedra stavebnej mechaniky  
Stavebná fakulta, STU v Bratislave  
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

**Oponenti:**

*prof. Ing. Justín Murín, DrSc.*  
Ústav automobilovej mechatroniky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky, STU v Bratislave  
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

*doc. Ing. Ján Slašťan, CSc.*  
STRABAG Pozemné a inžinierske staveiteľstvo s. r. o.  
Mlynské nivy 61/A, 820 15 Bratislava

*doc. Ing. David Lehký, Ph.D.*  
Ústav stavební mechaniky  
Fakulta stavební, VUT v Brne  
Veveří 331/95, 602 00 Brno

**Autoreferát bol rozoslaný dňa: 29.7.2020**

**Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 27.8.2020 o 11:30 h na** Katedre stavebnej mechaniky (SvF, STU v BA), Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

---

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.  
Dekan fakulty

## Abstrakt

Dizertačná práca je venovaná použitiu radarovej interferometrie pre systémovú identifikáciu a monitorovanie stavu mostných konštrukcií. Práca obsahuje zhrnutie doteraz získaných poznatkov o problematike systémovej identifikácie konštrukcií pomocou tejto technológie. Na základe mnohých skúseností s meraním pomocou interferometrického radaru IBIS-S bola zadefinovaná metodika experimentálnych meraní dynamických premiestnení rôznych reálnych mostných konštrukcií, ako aj vyhodnotenie meraných dát a posúdenie stavu meraných konštrukcií. Zároveň sa podarilo identifikovať možné poruchy na niektorých sledovaných konštrukciách. Radarové merania majú svoje výhody ale aj nevýhody, napriek tomu považujeme túto metódu za veľmi vhodnú, najmä pri meraní odozvy mostov bez obmedzenia dopravy.

## Obsah

1	Úvod .....	3
2	Ciele práce .....	4
3	Súčasný stav problematiky .....	4
4	Návrh metodiky merania pomocou interferometrického radaru .....	5
5	Numerické modely .....	8
6	Radar ako prostriedok pre dynamickú zaťažovaciu skúšku .....	9
7	Interakcia konštrukcie s podložíom a vplyv susedných konštrukcií .....	11
8	Vplyv nenosných prvkov na odozvu konštrukcie .....	13
9	Možnosť identifikácie poruchy ložísk na mostoch .....	14
10	Záver .....	18
11	Použitá literatúra .....	19
12	Zoznam vybraných publikovaných prác autora .....	20

## 1 Úvod

Systémová identifikácia konštrukcií je v súčasnosti veľmi rozšírenou témou pre množstvo vedeckých tímov a majiteľov či prevádzkovateľov stavieb po celom svete. Monitorovanie stavu konštrukcií nám pomáha lepšie porozumieť správaniu reálnych konštrukcií. Táto práca je zameraná na testovanie mostných konštrukcií. Dôvodom je hlavne rastúci vek a v niektorých prípadoch aj nadmerné zaťažovanie mostov, čo môže spôsobovať nemalé náklady na údržbu, no v tých závažnejších prípadoch až nutnosť odstránenia poškodenej konštrukcie a jej nahradenia novou.

Výhodou monitorovania stavu je včasná identifikácia porúch, ktoré dokážu byť odstránené opravami menšieho rozsahu. Dizertačná práca je venovaná testovaniu konštrukcií mostov pomocou radarovej interferometrie. Ide o technológiu na meranie vzdialeností a premiestnení viacerých bodov konštrukcie súčasne pomocou interferometrického radaru. Zariadenie je vhodné na meranie premiestnení konštrukcií s obmedzeným prístupom alebo v núdzových situáciách, kedy je potrebné realizovať rýchle testovanie konštrukcie z bezpečnej vzdialenosti. Radar vysiela mikrovlnné frekvencie v krátkych impulzoch a na základe časového rozdielu medzi vysielanými a prijímanými signálmi sa určujú vzdialenosti a premiestnenia viacerých bodov konštrukcie (IDS, 2010; Gocal, 2010; Gocal, 2013). V závislosti od intenzity odrazeného signálu je možné ľahko dosiahnuť presnosť merania 0,1 mm (IDS, 2010). Použitie tejto technológie je preto veľmi vhodné na meranie odozvy mostov bez dopravných obmedzení.

## 2 Ciele práce

Cieľom práce je zhrnutie poznatkov o problematike systémovej identifikácie konštrukcií pomocou radarovej interferometrie a zadefinovať metodiku experimentálnych meraní, ktoré boli a aj v budúcnosti budú realizované na reálnych konštrukciách. Bolo potrebné venovať sa najmä týmto témam:

- Automatické odstránenie chýb merania
- Lokalizácia a verifikácia počtu meraných bodov v radiálnych spádových oblastiach radaru
- Porovnanie záznamov premiestnení z radaru a zrýchlení meraných sústavou akcelerometrov
- Štatistické vyhodnotenie výsledkov s cieľom získať relevantné údaje pre SHM
- Overenie postupov na rôznych konštrukciách mostov
- Z porovnania experimentálnych a numerických analýz vyhodnotiť funkcie premiestnení premenné v čase v závislosti od dopravy a identifikovať prípadné poruchy

## 3 Súčasný stav problematiky

Systémová identifikácia (SI – *System Identification*) je proces identifikácie charakteristík a vlastností matematického modelu konštrukcie pomocou súboru vstupov a výstupov. Najčastejšie sa používa pri monitorovaní stavu stavebných konštrukcií (SHM – *Structural Health Monitoring*). Cieľom SHM je identifikácia možných poškodení konštrukcie, odhad skutočného stavu a jej potenciálu pre ďalšie používanie, prípadne posúdenie potreby opravy (Chatzi, 2016). Stav problematiky systémovej identifikácie a monitorovania stavu konštrukcií za posledné roky výrazne napreduje. Vo svete sa tejto téme venuje mnoho vedeckých tímov (Lehký, 2007; Farrar, 2016; Li, 2016; Strauss, 2018). Aj na Slovensku sa touto témou zaoberá niekoľko vedeckých tímov (Sokol, 2015, 2016, 2017; Melcer, 2015; Ároch, 2016). Testovanie konštrukcií má za sebou už pomerne dlhú históriu a preto existuje viacero

dostupných metód, ktorými je možné monitorovať konštrukcie a vyhodnocovať ich stav. Práce je venovaná jednej z nedeštruktívnych metód testovania odozvy konštrukcií – meraniu dynamických premiestnení pomocou radarovej interferometrie. Technológia mikrovlnnej interferometrie je široko používaná na štúdium zmien v nadmorskej výške zo satelitných snímkov, ktorému sa venujú najmä geodeti (Cigna, 2018; Leško, 2018; Cavalagli, 2019). Čoraz častejšie sa radarové merania používajú aj pri pozemnom prieskume na meranie premiestnení (Gocal, 2013; Plachý, 2017; Raventós, 2017; Barros, 2018; Talich, 2019; Pieraccini, 2019). Okrem využitia pri geodetických meraniach sa táto technológia začala používať aj pri meraní premiestnení stavebných konštrukcií. Ide o technológiu GBSAR (*Ground-based Synthetic Aperture Radar*) – radar vysiela mikrovlnné frekvencie vo veľmi krátkych impulzoch s veľkým výkonom. Tento signál sa odrazí od sledovaného objektu a vráti sa späť k radaru. Na základe časového rozdielu medzi vyslaným a prijatým signálom sú určované vzdialenosti a premiestnenia viacerých bodov konštrukcie súčasne (IDS, 2010; Gentile, 2010). Informácie o použití GBSAR sa začali objavovať vo vedeckej literatúre okolo roku 2000. Ako prví popísali použitie tejto technológie Tarchi a kol. (2000) z Univerzity vo Florencii. Radar bol testovaný pre množstvo použití. Koncept použitia GBSAR na sledovanie dynamickej odozvy stavebných konštrukcií vznikol v roku 2004 (Pieraccini, 2004). Radarová dynamická zobrazovacia schopnosť bola preukázaná monitorovaním kmitania oceľového mosta pri bežnej premávke. Na základe predpokladu, že významná dynamická odozva konštrukcie je obsiahnutá vo frekvenčnom rozsahu od 0 do 20 Hz, boli upravené nastavenia zariadenia pre použitie na dynamické snímanie stavebných konštrukcií. Bolo dokázané, že tento systém môže byť výkonným a univerzálnym nástrojom na dynamické testovanie alebo monitorovanie stavebných konštrukcií. Radar pracuje na diaľku a poskytuje efektívne zaznamenávanie premiestnení konštrukcie. Vzhľadom na vysokú vzorkovaciu frekvenciu dokáže zaznamenať rýchle pohyby konštrukcie vybudenej vonkajším zaťažením, ako napríklad vietor alebo doprava. Okrem toho je zariadenie prenosné a dá sa rýchlo nainštalovať a spustiť, čo vedie k tomu, že je vhodné na rýchle monitorovanie aj v núdzových situáciách. Prvý komerčne používaný systém IBIS (*Image by Interferometric Survey*) bol vyvinutý v roku 2007 Talianskou spoločnosťou Ingegneria dei Sistemi (IDS) v spolupráci s Univerzitou vo Florencii. Prvou verziou bol systém IBIS-L (*IBIS Landslides*) – na sledovanie zosuvov pôdy. V tejto verzii sú polohy bodov konštrukcie znázornené dvomi rozmermi. Druhou verziou je systém IBIS-S (*IBIS Structures*) – na meranie premiestnení stavebných konštrukcií, ktorá má možnosť zobrazovať body iba v 1D priestore, teda jedným rozmerom. Spoločnosť IDS neustále v tejto oblasti vyvíja a implementuje nové technológie (IDS GeoRadar, 2020).

## 4 Návrh metodiky merania pomocou interferometrického radaru

Poznatky a skúsenosti so zariadením boli použité pri mnohých meraniach dynamickej odozvy mostov. Základné postupy merania sú dané výrobcom radaru,

# STU

avšak pri skutočnom meraní nastáva množstvo špecifických situácií a problémov, ktoré treba riešiť. O mnohých týchto problémoch sme ani netušili a pri obsluhu radaru sa s nimi musíme častokrát vysporiadať. Riešenie niektorých je jednoduchšie a iné oveľa zložitejšie. Rýchlosť a presnosť merania pomocou interferometrického radaru vo veľkej miere závisí od zručnosti a skúseností osoby, ktorá toto zariadenie obsluhuje.

## ***Vhodné umiestnenie radaru***

Dôležité je nájsť vhodné miesto pre umiestnenie radaru. Vhodné miesto by malo umožňovať dostatočnú stabilizáciu radaru (najlepšie na pevnom podklade) a zároveň by malo byť dostatočne veľké na manipuláciu s ním. Jednou z nevýhod tejto technológie je veľmi vysoká citlivosť zariadenia na environmentálne vplyvy (tráva, kríky, konáre a pod.). Táto sa dá ale často eliminovať odstránením rušivých predmetov z meracieho dosahu radaru ešte pred začatím samotného merania. Pri každom meraní je veľmi dôležité presné zameranie prístroja vzhľadom na meranú konštrukciu. Interferometrický radar meria vzdialenosti a premiestnenia bodov v smere zámery - radiálne vzdialenosti a premiestnenia. Pre prepočet radiálnych premiestnení do požadovaného smeru je pri mostných konštrukciách veľmi dôležitá vertikálna vzdialenosť zariadenia od meraného bodu. Nepresné určenie tejto vzdialenosti môže byť zdrojom chýb pri prepočte.

## ***Cielenie a identifikácia meraných bodov konštrukcie***

Je veľmi dôležité zohľadniť skutočnosť, že radar robí priemer premiestnení všetkých bodov, ktoré sa nachádzajú v jednej radiálnej spádovej oblasti (Rbin). To môže byť zdrojom chýb pri identifikácii meraných bodov. Preto je výhodnejšie cieľiť radar na okraj konštrukcie tak, aby sa v jednotlivých radiálnych oblastiach nachádzalo čo najmenej rôznych bodov, ktoré odrážajú signál. Pri cílení radaru na konštrukciu je nutné sledovať na ovládacom počítači radiálny profil odrazivosti a treba nájsť vhodný sklon zariadenia, aby sme dosiahli čo najvyššiu intenzitu prijatého signálu. Vhodným nastavením polohy a sklonu radaru sa zvyšuje presnosť merania. Pre identifikáciu meraných bodov je potrebné poznať vzdialenosti konkrétnych bodov konštrukcie od zariadenia. Tieto vzdialenosti je možné odmerať napríklad laserovým diaľkomerom.

## ***Faktory, ktoré ovplyvňujú merania***

Na základe množstva skúseností s monitorovaním stavu rôznych mostných konštrukcií je možné povedať, na čo všetko je nutné myslieť pri meraní odozvy mostov v reálnych situáciách. Ide o vplyvy, ktoré sa častokrát nedajú eliminovať a preto je potrebné mať o nich dostatok informácií.

Jedným z týchto faktorov je doprava. Zastavenie dopravy na mostoch je veľmi zložitá a finančne náročná záležitosť. Tento fakt platí rovnako pre železničnú či cestnú dopravu. K obmedzeniu dopravy na moste sa preto pristupuje iba vo výnimočných

# STU

prípadoch. Často sa teda pristupuje k takzvaným redukovaným zaťažovacím skúškam, realizovaným bez obmedzenia dopravy – takže ide o finančne dostupný monitoring stavu konštrukcií. Z tohto dôvodu je nutné počas celého merania dôkladne zaznamenávať dopravnú situáciu na moste pomocou videozáznamov. Videozáznamy musia byť dostatočne kvalitné, aby z nich bolo možné určiť typ vozidla, rýchlosť prejazdu, pruh alebo koľaj, v ktorej sa pohybuje. Tieto parametre sú dôležitým vstupom pre následné numerické simulácie.

Ďalším faktorom sú poveternostné podmienky. Môžu mať výrazný vplyv na samotné meranie pomocou radarovej interferometrie ale aj na odozvu meranej konštrukcie. Okrem zaťaženia dopravou je konštrukcia prakticky celý čas zaťažaná vetrom a prípadnými výraznejšími zmenami teploty. V prípadoch, kedy počas merania fúka silnejší nárazový vietor, je nutné tieto vplyvy zohľadniť. Vplyv zmeny teploty je treba brať do úvahy hlavne pri dlhodobom sledovaní stavu konštrukcie, kedy je možné porovnať fungovanie mosta pri rôznych teplotách.

## *Spracovanie meraných dát*

Dáta získané pomocou interferometrického radaru je ťažké použiť priamo bez toho, aby sa čiastočne neupravili a nevyseletovali dôležité časti merania, prípadne urobili iné zásahy do dát.

- *Prepočet radiálnych premiestnení:* Radar meria premiestnenia v radiálnom smere, ktoré treba premietnuť do efektívneho smeru. Pri tejto úprave dát je veľmi dôležitá čo najpresnejšia identifikácia meraného bodu. Je potrebné poznať radiálnu vzdialenosť tohto bodu od radaru a zároveň príslušnú vertikálnu vzdialenosť.
- *Oprava dát:* Potrebný krok v prípadoch, kedy sa v záznamoch premiestnení viacerých bodov konštrukcie vyskytli v rovnakých časových okamihoch výraznejšie lokálne špičky. Pri vyhodnocovaní premiestnení ich môžeme ignorovať, pretože taká rýchla a veľká zmena premiestnenia nemá fyzikálny dôvod v tom okamihu vzniknúť. Toto môže skúsený operátor určiť iba ak má skúsenosti a súčasne disponuje presným – časovo synchronizovaným a úplným záznamom všetkých environmentálnych vplyvov a vplyvov dopravy. Na opravu týchto lokálnych špičiek sme v spolupráci so školiteľom napísali jednoduchý program.
- *Korekcia počiatočnej hodnoty relatívnej výchylky:* Korekcia počiatočnej hodnoty relatívnej výchylky, alebo hľadanie nulového priehybu konštrukcie, je nutné pri meraní konštrukcií bez obmedzenia dopravy – hlavne cestnej, pretože hustota tejto dopravy je výrazne vyššia v porovnaní so železničnou. Snažíme sa nájsť také situácie (videozáznam), kedy sa na moste nachádza len zanedbateľná doprava a v týchto intervaloch určíme hodnotu relatívnej nuly. Hodnoty merané radarom sú relatívne s nulovou hodnotou v prvom okamihu merania. Celý záznam sa teda

# STU

posunie tak, aby v čase, kedy na moste nie je takmer žiadna doprava, boli relatívne premiestnenia nulové.

- *Vlastné frekvencie kmitania konštrukcie:* Na určenie vlastných frekvencií kmitania meraných konštrukcií boli zo záznamov premiestnení pomocou Fourierovej transformácie vytvárané amplitúdové spektrá premiestnení, teda závislosti medzi amplitúdami premiestnení a frekvenciou kmitania. Použitá bola diskretná Fourierova transformácia (*Discrete Fourier Transform - DFT*). Na DFT som napísala program. Toto nie je síce veľmi zložitý výpočet, ale opäť sa jedná o odovzdanie našej skúsenosti, ako získať ešte lepšie výsledky.
- *Tlmenie konštrukcie:* Zo záznamov premiestnení sa dá pomerný útlm určiť pomerne jednoducho a presne. Takéto záznamy málokedy získame pri meraní snímačmi zrýchlení – akcelerometrami. Záznamy zrýchlení teda obsahujú aj kmitanie s vysokými frekvenciami a preto ich treba pred určovaním tlmenia filtrovať, čo by mohlo ovplyvniť výsledok. Naopak pri meraní premiestnení pomocou radaru, kedy je zaznamenávané priamo premiestnenie konštrukcie, záznamy neobsahujú vysokofrekvenčné kmitanie.

Mnohé z vyššie opísaných poznatkov by sa na prvý pohľad mohli zdať triviálne, ale až skúsený užívateľ radaru sa s nimi vie vysporiadať a nájsť vhodné východisko. Mnohokrát kompromis pri umiestnení radaru znamená enormné množstvo práce pri zostavovaní numerických modelov a následných výpočtoch. Z toho vyplýva, že nestačí iba poznať dobre meraciu aparatúru. Ak chceme získať kvalitné výsledky, treba rozumieť princípom fungovania meranej konštrukcie.

## 5 Numerické modely

Spracovanie výsledkov z akéhokoľvek merania a ich zhodnotenie predpokladá, že máme vedomosť o fungovaní konštrukcie. Zo skúseností vyplýva, že bez dôslednej a podrobnej numerickej analýzy je veľmi ťažké správne vyhodnotiť všetky merania. Porovnaním numerických výpočtov a meraných dát máme možnosť odhaliť niektoré poruchy konštrukcií, ktoré nemusia byť viditeľné. Zároveň môžeme overiť vplyv niektorých nenosných prvkov konštrukcie na jej správanie. Konštrukcie som modelovala podľa projektovej dokumentácie v programe ANSYS v prostredí Mechanical APDL.

### *Kvazi-statické výpočty*

Pomocou podrobných numerických modelov boli počítané vplyvové čiary, na ktoré boli aplikované nápravové sily od železničnej a cestnej dopravy. Vstupné údaje o vozidlách boli určené z videozáznamov. Hoci je výpočet pomocou vplyvových čiar na prvý pohľad triviálnou záležitosťou, pri praktickom vyhodnotení merania je celkom ťažké z výpočtu získať priebehy premiestnení, ktoré by boli v dobrej zhode s meranými priebehmi.



# STU

Pri výpočtoch premiestnení od železničnej dopravy majú na výsledky veľký vplyv rôzne detaily, ako napríklad umiestnenie koľaje v priečnom reze mosta (centricky alebo excentricky) alebo zle určená rýchlosť prejazdu. Pri mostoch s koľajou vedenou v oblúku zohráva práve rýchlosť prejazdu výraznú rolu pri určení veľkosti nápravových síl na jednotlivé koľaje. Nápravové sily sú v takomto prípade ovplyvnené odstredivými silami. Okrem toho sú často tieto trate vedené v prechodniciach a nemajú tvar kružnice, takže na prvý pohľad triviálny výpočet sa stáva relatívne náročnou úlohou a pri jej riešení treba byť veľmi dôsledný.

Aj v prípadoch, kedy sa na konštrukcii nachádzala okrem železničnej aj automobilová doprava, ide v skutočnosti o zložitý problém. Pri výpočtoch sa zaťaženie môže pohybovať po niekoľkých zaťažovacích pruhoch, napríklad na Prístavnom moste po dvoch železničných koľajach a štyroch cestných pruhoch, v oboch smeroch. Na moste sa zároveň nachádza takmer vždy niekoľko rôznych vozidiel pohybujúcich sa rôznymi rýchlosťami, ktoré navyše počas jazdy cez most môžu prechádzať z pruhu do pruhu. Existuje teda veľké množstvo skutočností, ktoré treba pri výpočte brať do úvahy a opäť sa z relatívne jednoduchej úlohy stáva zložitou. Pri výpočte je nutné urobiť veľké množstvo vplyvových čiar a byť ešte dôslednejší pri zaznamenávaní dopravnej situácie na moste počas merania. Videozáznamy musia byť dostatočne detailné aby bolo možné dostatočne presne interpretovať všetky zaťažovacie sily počas merania.

## *Vlastné tvary a frekvencie*

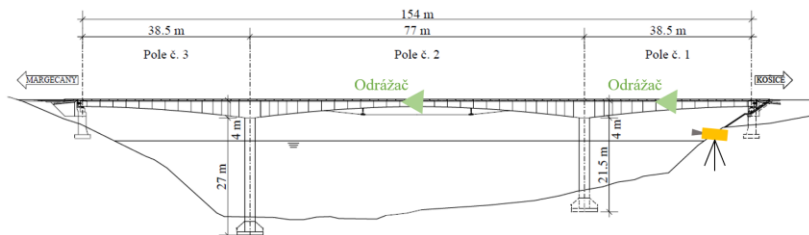
Vlastné tvary a vlastné frekvencie kmitania patria k dôležitým parametrom. Ich výpočet je nutný pred aj po uskutočnení merania dynamickej odozvy konštrukcie. Pred meraním sú podľa vypočítaných tvarov kmitania vyberané vhodné body merania na konštrukcii tak, aby bolo možné pomocou meraných dát dostatočne vystihnúť skutočné tvary kmitania. Po meraní je možné dáta porovnať s vypočítanými parametrami a tak overiť správne fungovanie konštrukcie. Sú taktiež dôležitým prostriedkom pri kalibrácii numerických modelov.

## **6 Radar ako prostriedok pre dynamickú zaťažovaciu skúšku**

Účelom zaťažovacích skúšok je preveriť statickú a dynamickú funkciu skúšanej konštrukcie. Výsledky zaťažovacích skúšok sú podkladom pri posúdení spoľahlivosti meranej mostnej konštrukcie. Vzhľadom na mnohé výhody použitia interferometrického radaru bola táto technológia použitá aj ako prostriedok pre dynamickú zaťažovaciu skúšku mosta cez vodnú nádrž Ružín. Mostný objekt tvorí trojpoľová rámová, dvoj-komorová betónová konštrukcia s celkovou dĺžkou 156 m.

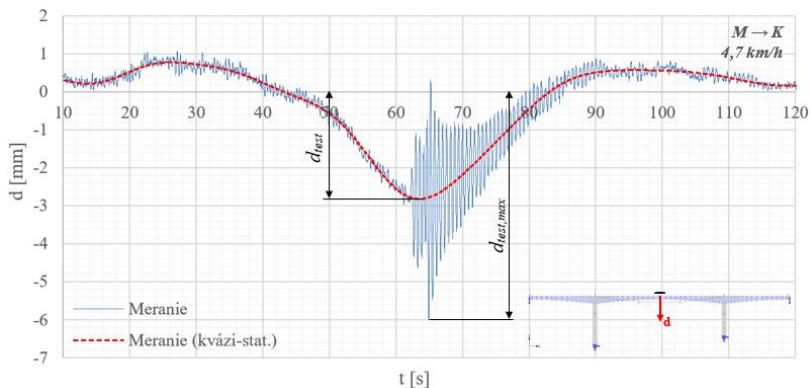
Pri meraní betónového mosta cez Ružínsku priehradu boli v strede rozpätia sledovaných mostných polí pre zvýšenie odrazivosti cieľa umiestnené odrážače signálu (Obr. 6.1). Pri zaťažovacích skúškach sa dôsledne sleduje pôsobenie skúšobného zaťaženia na odozvu mosta. Pri zaťažovacej skúške bolo k dispozícii dvojnápravové zaťažovacie vozidlo, ktoré prechádzalo cez umelú prekážku

(umiestnenú v strede rozpätia hlavného poľa mosta) rôznymi rýchlosťami od 5 km/h do 60 km/h v oboch smeroch. Časové záznamy odozvy konštrukcie boli okrem interferometrického radaru zaznamenávané aj pomocou snímačov zrýchlení (akcelerometrov) a tenzometrických snímačov. Zároveň bol priebeh skúšky zaznamenaný aj pomocou videozáznamu, čo umožnilo neskôr overiť rýchlosť vozidla a jeho správny prejazd cez prekážku.



Obr. 6.1 Schéma umiestnenia radaru (most cez Ružín)

Radarové merania prebiehali v dynamickom režime so vzorkovacou frekvenciou 200 Hz. Na Obr. 6.2 sa nachádza jeden z priebehov premiestnení od prejazdu skúšobného vozidla cez prekážku umiestnenú v strede hlavného poľa rýchlosťou 4,7 km/h v smere z Margecian do Košíc.



Obr. 6.2 Priebeh premiestnení pri prejazde vozidla cez umelú prekážku

Podľa STN 73 6209 sa pri dynamických zaťažovacích skúškach majú vyhodnocovať údaje ako dynamický súčiniteľ, vlastné frekvencie zaťaženej a nezaťaženej konštrukcie a tlmenie konštrukcie. Tieto parametre je možné určiť zo záznamov premiestnení. Základným kritériom pri vyhodnocovaní skúšky je porovnanie jej výsledkov meraní s výpočtom. Porovnávajú sa najmä vypočítané a

# STU

merané hodnoty dynamických súčiniteľov. Hodnotí sa každá skúšobná jazda, pričom minimálny počet prejazdov je 10. Hodnoty meraných dynamických súčiniteľov  $\delta_{d,test}$  boli určené ako podiel maximálnej hodnoty meraného priehybu  $d_{test,max}$  a maximálnej kvázi-statickej hodnoty meraného priehybu  $d_{test}$  (Obr. 6.2). Dynamická zaťažovacia skúška sa vyhodnocuje podľa kritérií normy pre zaťažovacie skúšky mostov STN 73 6209. Hodnoty dynamických súčiniteľov sa vykresľujú vo forme grafu v závislosti od rýchlosti prejazdu vozidla, z ktorých bolo možné určiť kritickú rýchlosť.

V minulosti sa pre výpočet dynamického súčiniteľa najčastejšie používali snímače pomerných pretvorení (tenzometre). Ich inštalácia je veľmi zložitá a vyžaduje si často zastavenie dopravy, trvá veľmi dlho a je aj drahá. V tejto kapitole opisujeme veľmi cenný poznatok, že dynamické súčinitele je možné vyhodnotiť z meraní pomocou interferometrického radaru. V tejto kapitole sme sa snažili preukázať, že radar je výborným prostriedkom aj pre klasickú dynamickú zaťažovaciu skúšku podľa normy. Výhody jeho použitia oproti klasickým meraniam sú napríklad:

- Veľmi rýchla príprava meracej aparatúry in-situ
- Inštalácia meracích zariadení, napríklad radarových odrážačov bez obmedzenia dopravy
- Možnosť sledovať merané veličiny v rádovo desiatkach až stovkách bodov
- Meranie je cenovo dostupné
- Ľahko možno zabezpečiť opakovateľnosť meraní

## 7 Interakcia konštrukcie s podložíom a vplyv susedných konštrukcií

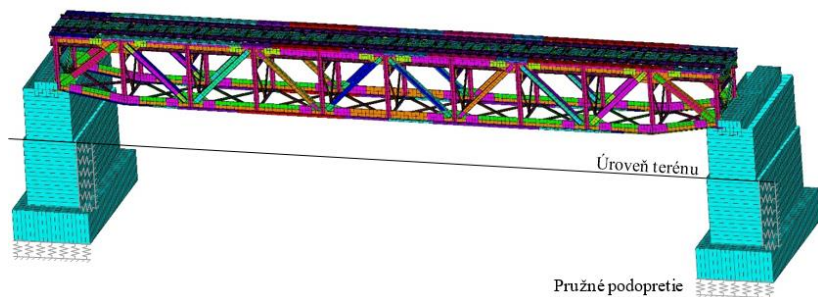
Pre lepšie vystihnutie globálnej odozvy konštrukcií bolo v niektorých prípadoch nutné venovať sa podrobnejšie interakcii konštrukcie s podložíom. Modelované boli teda aj pružne podopreté piliere, na ktorých sú konštrukcie uložené. Aj v tomto prípade sa nám potvrdila opodstatnenosť tvorby podrobných výpočtových modelov, bez ktorých by sme len ťažko zistili čo všetko ovplyvňuje globálnu dynamickú odozvu konštrukcií. Táto kapitola je venovaná meraniu a vyhodnoteniu dynamickej odozvy mosta cez Váh v obci Trnovec nad Váhom (Šaľa) (Obr. 7.1). Ide o oceľový most, ktorý sa skladá z 28 objektov (priehradové aj plnostenné objekty).



Obr. 7.1 Most cez Váh v obci Trnovec nad Váhom

Pred samotným meraním boli urobené predbežné výpočty. Vzhľadom na veľký počet polí sme sa venovali iba vybraným konštrukciám, a to boli hlavne tie, ktoré sa nachádzali na inundačnom území, keďže prístup k nim bol bezproblémový. Pomocou interferometrického radaru bola zaznamenaná dynamická odozva 12 rôznych konštrukcií. Všetky numerické modely priehradových konštrukcií som vytvorila v programe ANSYS (Obr. 7.2). Plnostenné konštrukcie boli vypracované v rámci riešiteľského kolektívu. Pri vyhodnocovaní meraní sme narazili na isté nezrovnalosti. Rozdiel medzi nameranými hodnotami a vypočítanými bol pomerne veľký. Rozdiely sa týkali premiestnení, ale aj vlastných frekvencií a tvarov kmitania. Pri premiestneniach bol rozdiel 8,8 % (Obr. 7.3). Výraznejšie odchýlky boli taktiež zaznamenané pri porovnaní vlastných frekvencií. Pri prvej vlastnej frekvencii kmitania v horizontálnom smere dosahoval tento rozdiel až hodnotu 9,2 % a pri druhom vlastnom tvare kmitania vo vertikálnom smere to bolo 4,1 %.

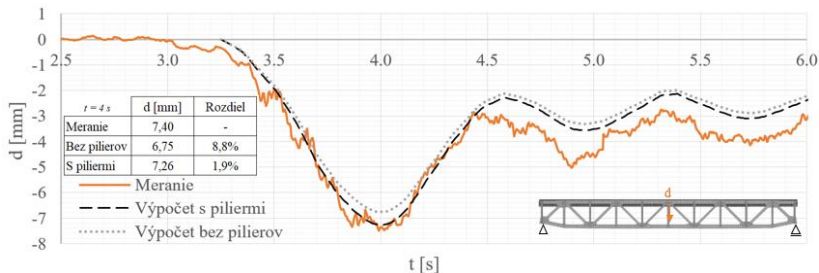
Z predchádzajúcich meraní pomocou interferometrického radaru sme nadobudli skúsenosť, že porovnanie merania a výpočtu je v relatívne dobrej zhode. Pri porovnaní s numerickými výpočtami sa rozdiely pohybovali v hodnote do 5%. Vzhľadom na to, že konštrukcie boli modelované dostatočne podrobne, bolo potrebné hľadať dôvod týchto rozdielov. V tomto prípade celý problém spočíval v zohľadnení interakcie konštrukcie a podložia, čo nie je vždy potrebné. Zvyčajne stačí modelovať samotnú konštrukciu iba s podopretím na pilieroch. V tomto prípade má ílovité podložie malú tuhosť a tak spoločné kmitanie pilierov a mosta výrazne ovplyvňuje výsledky. Pre lepšie vystihnutie celkovej globálnej odozvy konštrukcií boli modelované aj piliere a prislúchajúca časť podložia (Obr. 7.2). Časť piliera nachádzajúca sa pod zemou bola pružne podopretá v horizontálnom smere a základová doska piliera bola podopretá vo vertikálnom smere. Na jednom pilieri sú uložené aj ďalšie tri susedné objekty. Vplyv susedných objektov musí byť pri výpočte taktiež zohľadnený. Spomenuté objekty boli zjednodušene namodelované ako pridané hmotnosti na pilieri v miestach ich podoprenia.



Obr. 7.2 Výpočtový model konštrukcie mosta s piliermi

Doplnením vplyvu pilierov a susedných konštrukcií sa zhoda medzi meraním a výpočtom dostala na očakávanú hodnotu, kedy rozdiel nepresahoval do  $\pm 5\%$ .

Okrem veľkosti premiestnení boli porovnávané aj vlastné tvary a frekvencie kmitania konštrukcií. Frekvencie boli určené zo záznamov premiestnení a pre porovnanie boli súčasne urobené aj merania pomocou snímačov zrýchlení. Rozdiel medzi meraním a výpočtom sa zmenšil pri prvej vlastnej frekvencii na 0,3 % a pri druhej na 3,4 %.



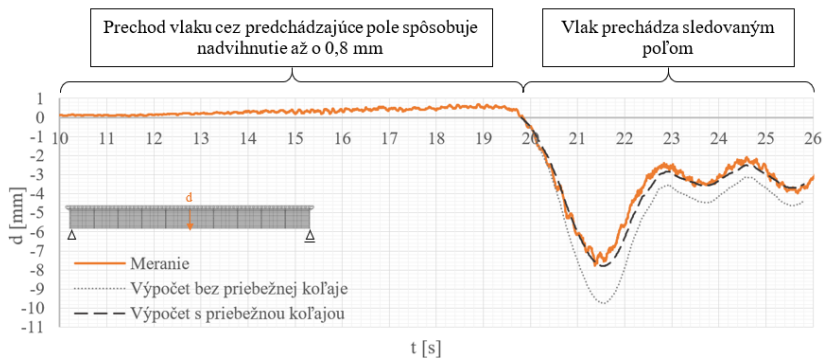
Obr. 7.3 Vplyv interakcie s podložíom na premiestnenia

Po zohľadnení interakcie konštrukcie s podložíom a vplyvu susedných objektov na odozvu konštrukcie boli výsledky merania a výpočtov v celkom dobrej zhode.

## 8 Vplyv nenosných prvkov na odozvu konštrukcie

Aj táto kapitola je venovaná meraniu mosta cez Váh v obci Trnovec nad Váhom (Obr. 7.1). V prípade tohto mosta sa totiž vyskytol zaujímavý jav v dôsledku konštrukcie priebežnej koľajovej dráhy, prechádzajúcej viacerými poľami mosta (prostými nosníkmi). V takom prípade má vplyv na odozvu konštrukcie nielen interakcia s podložíom, ale aj modelovanie takých na prvý pohľad bezvýznamných prvkov, ako sú koľajnice. Priebežné koľajnice sa nachádzajú hlavne na plnostenných poliach mosta. Pri prechode zaťaženia cez susedné polia mosta dochádza k nadvihnutiu sledovaného dosiaľ nezaťaženého poľa (Obr. 8.1). Tento efekt je významný, pretože stred otáčania mosta okolo jeho priečnej horizontálnej osi je na úrovni ložísk, zatiaľ čo koľajnica je umiestnená úplne na protiahlom hornom okraji priečného rezu mosta.

Na Obr. 8.1 sa nachádza porovnanie výsledkov merania a výpočtu premiestnení vybranej konštrukcie pri prechode osobného vlaku. Z porovnania výsledkov merania premiestnení pomocou radaru a numerických výpočtov vyplýva, že pri výpočtoch by mali byť zohľadnené aj niektoré z nenosných prvkov konštrukcie, ako napríklad koľajnice. V opačnom prípade by sa výsledky meraní a výpočtov mohli výrazne líšiť, napríklad tak ako v tomto prípade o viac ako 30%. Efekt nadvihnutia zároveň vysvetľuje v tomto prípade dôvod vzniku mnohých škôd na zvaroch kontaktných platní pod koľajnicami sústredených v blízkosti podpier na začiatku mostného poľa.



Obr. 8.1 Vplyv priebežnosti koľaje na premiestnenia

## 9 Možnosť identifikácie poruchy ložísk na mostoch

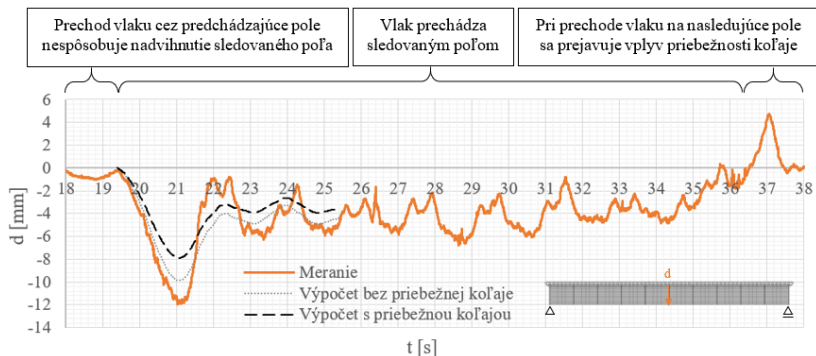
Pri monitorovaní stavu mostných konštrukcií je veľmi dôležité poznať fungovanie pozorovanej konštrukcie. Zo skúseností vyplýva, že bez dôslednej a podrobnej numerickej analýzy je veľmi ťažké správne vyhodnotiť všetky merané dáta. Bez kalibrovaných numerickej modelov by v niektorých prípadoch nebolo možné overiť správne fungovanie konštrukcií. Porovnaním numerickej výpočtov a meraných dát máme možnosť odhaliť niektoré poruchy konštrukcií, ktoré nemusia byť viditeľné.

### Identifikácia existencie poruchy na moste

Identifikácia existencie poruchy je prvým stupňom pri SHM. Tu sa snažíme odpovedať iba na otázku, či je alebo nie je na konštrukcii porucha. To sa nám podarilo pri meraní, ktoré je opísané v tejto kapitole. Kapitola je venovaná vyhodnoteniu merania mosta cez Váh v obci Trnovec nad Váhom (Obr. 7.1). Ide o veľmi rozsiahlu konštrukciu, kde sme mali možnosť analyzovať rôzne vplyvy na dynamickú odozvu jednotlivých konštrukcií. Aj napriek zohľadneniu vplyvu interakcie s podloží, vplyvu susedných objektov a vplyvu priebežnej koľaje boli pri jednom z 28 objektov zistené rozdiely medzi meranými a vypočítanými výsledkami premiestnení a frekvencií. Jedná sa o jednu z plnostenných konštrukcií. Keďže na tejto konštrukcii sa nachádza priebežná koľaj, bol očakávaný priebeh premiestnení podobný tomu na Obr. 8.1. V čase kedy sa vlak nachádzal na predchádzajúcej konštrukcii, malo dôjsť k nadvihnutiu sledovanej konštrukcie. Tento efekt sa na rozdiel od ostatných konštrukcií neobjavil.

Z priebehu premiestnení meraného bodu v strede rozpätia konštrukcie na Obr. 9.1 je zrejme, že konštrukcia sa nespráva tak, ako by sme predpokladali. Rozdiel medzi vypočítaným a meraným prichybom je až +49% (meraný prichyb je väčší). Rozdiel môže byť spôsobený rôznymi vplyvmi, napríklad nesprávnym fungovaním

ložisk, vplyvom podložia, zmenou v priebežnosti koľaje, ale aj zmenami tuhosti nosných prvkov, teda inou statickou schémou ako je predpokladané v projekte, prípadne môžu byť aj iné príčiny.



Obr. 9.1 Premiestnenia konštrukcie s možnou poruchou

Výsledkom sledovania stavu konštrukcie pomocou meraní (SHM), takzvanej identifikácie sú tri fázy opisu poruchy: 1. existencia poruchy, 2. lokalizácia poruchy, 3. zistenie miery poruchy. V tomto prípade sme identifikovali iba 1. fázu procesu. Bolo odporučené podrobnejšie sledovanie tejto konštrukcie. Neskôr sme u správcu zistili, že na práve na tomto poli sa museli sanovať ložiská pre ich nefunkčnosť.

### Lokalizácia poruchy ložísk

Lokalizácia poruchy je druhým stupňom pri SHM. Tu sa snažíme odpovedať na otázku, nielen či je na konštrukcii porucha, ale aj kde sa nachádza. To sa nám podarilo pri meraní, ktoré je opísané v tejto kapitole. Kapitola je venovaná meraniu, vyhodnoteniu a identifikácii poruchy na Prístavnom moste v Bratislave. Ide o združený diaľnično-železničný most, ktorý je tvorený štyrmi poľami. Hlavný objekt je dvojpodlažný (Obr. 9.2). V spodnej časti mosta vedie železničná trať a v hornej časti mosta vedie diaľnica.

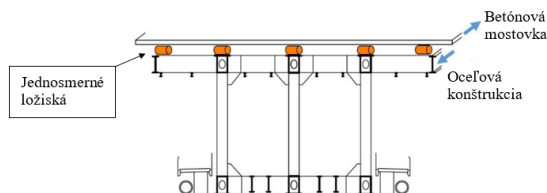


Obr. 9.2 Numerický model Prístavného mosta v Bratislave

Použitý bol už existujúci podrobný výpočtový model konštrukcie (Obr. 9.2), ktorý bol v spolupráci s riešiteľským tímom doplnený o niekoľko detailov, ako napríklad prvkovú mostovku vymodelovanú zo stenových prvkov a niektoré

styčnikové plechy. Model bol kalibrovaný a verifikovaný, takže poskytoval dobrú zhodu výsledkov napätí, premiestnení a frekvencií a tvarov kmitania v porovnaní s experimentálnymi meraniami.

Merania prebiehali bez obmedzenia dopravy na moste. Doprava bola počas merania zaznamenávaná pomocou videokamery. Súčasne bola pomocou anemometra meraná rýchlosť vetra v strede hlavného poľa. Pomocou týchto záznamov bolo možné realizovať numerické simulácie, kedy bolo na numerický model aplikované zaťaženie od reálnej dopravy a vetra. Tieto záznamy boli porovnávané. Vďaka skúsenosti s meraním premiestnení desiatok rôznych mostov, kedy výsledky výpočtov a meraní sa navzájom zhodovali na približne  $\pm 5\%$ , sme pri meraní tohto mosta natrafili na väčšie nezrovnalosti medzi meranými a vypočítanými hodnotami. Boli sme nútení hľadať príčinu. Otázkou bolo, či je to následok chyby merania alebo zmenou systému fungovania konštrukcie. Urobili sme množstvo porovnávacích výpočtov. Rozdiel medzi meranými a vypočítanými hodnotami bol však taký veľký (až 25%), že jediné vysvetlenie bolo že v tuhosti priečného rezu nie je započítaná nejaká významná časť priečného rezu. Vyšlo nám, že to bude pravdepodobne ŽB mostovka, ktorá bola navrhnutá tak, aby nespôsobovala s oceľovými priehradovými nosníkmi (Obr. 9.3), avšak meraním sa preverilo, že to tak nie je a že sústava rádoovo stovák posuvných ložísk medzi mostovkou a oceľovou konštrukciou zrejme nefungujú podľa predpokladu ako klzné ložiská, ale vo väčšej miere nedochádza k poklzu a pri prenose zaťaženia v priečnom reze preberá nejaké účinky aj mostovka. Je to odvážne tvrdenie, ale bolo potvrdené aj nezávislým meraním vlastných tvarov a frekvencií vo vertikálnom smere.



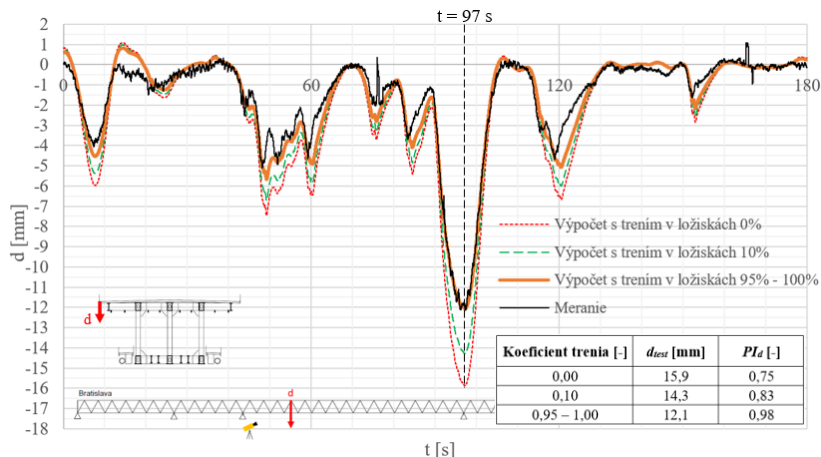
Obr. 9.3 Trecie sily v ložiskách

Nakoľko nepoznáme stav ložísk spájajúcich oceľovú konštrukciu s betónovou mostovkou, bolo nutné numericky vyšetriť viac alternatív. Prvou alternatívou bol stav, kedy ložiská fungujú dokonale, a teda koeficient trenia v ložiskách by mal hodnotu 0,00. Inou alternatívou bol opačný stav a koeficient trenia v ložiskách by mal hodnotu 0,95 - 1,00. Poslednou alternatívou bola taká situácia, kedy sa predpokladal koeficient trenia v ložiskách iba s hodnotou 0,10.

Na Obr. 9.4 sa nachádza porovnanie záznamu premiestnení meraného bodu a vypočítaných priebehov s rôznym trením v ložiskách. Výraznejšie premiestnenie v čase medzi 90 s a 100 s spôsobuje prejazd osobného vlaku. Zároveň sa v tomto čase na moste nachádza aj niekoľko nákladných áut v smere z Petržalky. Maximálne



premiestnenie meraného bodu v čase 97 s  $d_{test}$  má hodnotu 11,9 mm. Numericky určené hodnoty premiestnení  $d_{num}$  tohto bodu sa nachádzajú v tabuľke na Obr. 9.4. Pre porovnanie numerických výsledkov s údajmi zo skúšky bol použitý ukazovateľ zhody  $PI_d$  – podiel maximálneho vypočítaného premiestnenia  $d_{num}$  a maximálnej kvázi-statickej meranej hodnoty  $d_{test}$ . Tento ukazovateľ ukazuje, ako výsledok numerického modelu zodpovedá údajom zo skúšok.



Obr. 9.4 Porovnanie merných a vypočítaných premiestnení

Vypočítané hodnoty premiestnení s koeficientom trenia s hodnotou 0,95 sú v celkom dobrej zhode s meranými veličinami. Z tabuľky na Obr. 9.4 je zjavné, že ak je trenie v ložiskách má výrazný vplyv na veľkosť meraných premiestnení.

Okrem premiestnení boli porovnávané aj hodnoty prvých vlastných frekvencií kmitania vo vertikálnom smere. Vlastné frekvencie kmitania boli určené z meraných záznamov premiestnení a overené aj meraním pomocou akcelerometrov. Napríklad rozdiel medzi meranou a vypočítanou prvou vlastnou frekvenciou bol pri výpočte koeficientom trenia 0,00 až 11 %. Až vlastné frekvencie konštrukcie vypočítané s koeficientom trenia v ložiskách približne 0,95 sú v dobrej zhode s nameranými hodnotami.

Použitím dvoch nezávislých meraní (pomocou akcelerometrov a interferometrického radaru) a ich porovnaním s kalibrovaným numerickým modelom môžeme vysloviť predpoklad, že ložiská medzi betónovou doskou a ocelovými nosníkmi sú z nejakého dôvodu zaseknuté. Tieto ložiská by sa mali voľne kĺzať v pozdĺžnom smere. Môže to byť spôsobené koróziou, znečistením, zlou údržbou atď. U správcu mosta sme sa informovali a zistili sme, že počas revíziínych prehliadok neboli tieto ložiská kontrolované pre ich neprístupnosť. Je zjavné, že na betónovú

mostovku sa prenášajú ďalšie účinky (napätia v pozdĺžnom smere) spôsobené interakciou oboch častí. Tieto dve nezávislé merania ukazujú na tú istú príčinu a preto sa odvážime tvrdiť že efekt, ktorý sa pri meraní prejavuje by sa prejavovať nemal a ložiská spájajúce železobetónovú mostovku s oceľovou konštrukciou mosta nemusia fungovať správne. Na túto skutočnosť bol upozomený správca objektu.

## 10 Záver

Práca sa zaoberá meraním interferometrickým radarom s dôrazom na systémovú identifikáciu mostných konštrukcií. Bola spracovaná detailná metodika merania mostných konštrukcií, ktorá bola overená na viacerých reálnych konštrukciách. Táto metodika udáva ako umiestňovať, cieľiť radar a na aké body sa sústrediť. Popísané boli výhody aj nevýhody použitia interferometrického radaru pri monitorovaní stavu mostov, ako aj odporúčania pre budúce merania pomocou tohto zariadenia.

Boli presne popísané postupy pri spracovaní meraných dát. Vytvorené boli programy na opravu meraných dát ako aj na určenie vlastných frekvencií kmitania pomocou DFT. Výsledky experimentálnych meraní premiestnení môžu byť vhodným vstupom pre systémovú identifikáciu.

Potvrdený bol aj význam a veľký prínos tvorby detailných výpočtových modelov konštrukcií. Modely boli kalibrované a výsledky výpočtov boli v celkom dobrej zhode s výsledkami meraní. Z desiatok meraní, ktoré sme uskutočnili, vyplýva, že pokiaľ sa urobí precízne meranie a súčasne kvalitný numerický model, potom rozdiely, ktoré môžeme dosiahnuť medzi experimentom a výpočtom nepresahujú 5%. Akákoľvek väčšia chyba signalizuje nezrovnalosť medzi modelom a skutočnosťou, čo možno použiť pre identifikáciu porúch.

Ďalším našim dôležitým záverom je, že merania bez následnej analýzy konštrukcie podrobným výpočtom, majú malú výpovednú hodnotu a ťažko sa z nich robia závery. Akonáhle máme numerické modely, kalibrované podľa experimentu, môžeme celý systém použiť pre účely SHM. Za pomoci numerických simulácií sa dokonca podarilo odhaliť nielen poruchu ale aj jej lokalizáciu.

Radarové meranie poskytuje také množstvo údajov, že porovnaním s numerickým výpočtom môžeme definovať parametre vhodné pre opakované merania, ako je napríklad indikátor zhody premiestnení  $PI_d$ , ktorý môžeme vyhodnotiť v desiatkach okamihov a tak získať štatisticky presnejšie veličiny. Analýza dát umožňuje urobiť aj vážené priemery, čo ďalej spresňuje štatistické výpočty.

## 11 Použitá literatura

- ÁROCH, R., SOKOL, M., VENGLÁR, M.: Structural Health Monitoring of Major Danube Bridges in Bratislava. In: *Procedia Engineering: 9th International Conference "Bridges in Danube Basin 2016"*, Žilina, SR, 30. 9. - 1. 10. 2016. 2016, 156, pp. 24-31. ISSN 1877-7058. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.263.
- BARROS, R. C., PAIVA, F. M.: On the use of radar interferometry for the structural monitoring of bridges. In: *Proceedings IRF2018: 6th International Conference Integrity-Reliability-Failure Lisbon/Portugal 22-26 July 2018*. INEGI/FEUP, 2018. pp. 1287-1300. ISBN: 978-989-20-8313-1.
- CAVALAGLI, N. et al.: Satellite radar interferometry and in-situ measurements for static monitoring of historical monuments: The case of Gubbio, Italy. In: *Remote Sensing of Environment* [online]. 2019, 235. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111453. ISSN 00344257.
- CIGNA, F.: Observing Geohazards from Space. In: *Geosciences* [online]. 2018, 8(2). DOI: 10.3390/geosciences8020059. ISSN 2076-3263.
- FARRAR, C. R., LYNCH, J. P., MICHAELS, J. E.: Structural health monitoring: technological advances to practical implementations [scanning the issue]. In: *Proceedings of the IEEE*. August 2016. Vol. 104: Iss. 8. ISSN 0018-9219.
- GENTILE, C.: Application of Radar Technology to Deflection Measurement and Dynamic Testing of Bridges – Chapter 8. In: *Radar Technology*. Rijeka, Croatia: InTech, 2010. ISBN: 978-953-307-029-2. DOI: 10.5772/71178.
- GOCAL, J. et al.: *Determination of displacements and vibrations of engineering structures using ground-based radar interferometry*. Krakow, Poland: Wydawnictwa AGH, 2013. 267 s. ISBN 978-83-7464-645-1.
- CHATZI, E. and C. PAPADIMITRIOU: *Identification Methods for Structural Health Monitoring* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2016. CISM International Centre for Mechanical Sciences. DOI: 10.1007/978-3-319-32077-9. ISBN 978-3-319-32075-5.
- IDS GeoRadar, 2020. Products – Interferometric Radar. [cit. 20. aprila 2020] Dostupné na internete: <https://idsgeoradar.com/products/interferometric-radar/>
- INGEGNERIA DEI SISTEMI (IDS) S.p.A.: *IBIS-S Controller Software ver. 02.02.000 – User Manual*. Pisa: 2010 b. 51s.
- LEHKÝ, D. et al.: Dynamic damage identification based on artificial neural networks, SARA – Part IV. In: *The 3rd International conference on structural health monitoring of intelligent infrastructure, Vancouver, British Columbia, Canada. 2007*. p. 183. ISBN: 978-0-9736430-4-6.
- LEŠKO, M. et al.: Monitoring of natural hazards in Slovakia by using of satellite radar interferometry. In: *Procedia Computer Science* [online]. 2018, 138, 374-381. DOI: 10.1016/j.procs.2018.10.053. ISSN 18770509.
- LI, H.-N. et al.: Structural health monitoring of innovative civil engineering structures in Mainland China. In: *Structural Monitoring and Maintenance*. Techno-Press 2016, pp. 1-32, ISSN 2288-6605.
- MELCER, J.: Dynamic Response of a Bridge Due to Moving Loads. In: *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 3(2), 2015, pp. 199-209 ISSN 2321-3558.
- PIERACCINI, M. et al.: High-speed CW step-frequency coherent radar for dynamic monitoring of civil engineering structures. In: *Electronics Letters* [online]. 2004, 40(14). DOI: 10.1049/el:20040549. ISSN 00135194.

- PIERACCINI, M. et al.: Experimental Dynamic Impact Factor Assessment of Railway Bridges through a Radar Interferometer. In: *Remote Sensing* [online]. 2019, 11(19). DOI: 10.3390/rs11192207. ISSN 2072-4292.
- PLACHÝ, T., POLÁK, M. and RYJÁČEK, P.: Assessment of an Old Steel Railway Bridge Using Dynamic Tests. In: *Procedia Engineering* [online]. 2017, 199, pp. 3053-3058. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.555. ISSN 18777058.
- RAVENTÓS, J., COUSO, C., GARCÍA, J.: The use of InSAR technology to monitor ground and structural displacement. In: *INGEO 2017 Proceedings of the 7th International Conference on Engineering Surveying*. Lisbon, Portugal, October 18-20. 2017, pp. 303-310, ISBN 978-972-49-2300-0.
- SOKOL, M. et al.: Experience with Dynamic Measurement of the Port Bridge, In: *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings: proceedings of 13th International Conference*. Bratislava, Slovakia, 15. - 16. 10. 2015. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2015. ISBN 978-80-227-4463-8.
- SOKOL, M. et al.: Initial Experimental Test of the Port Bridge for Structural Health Monitoring. In: *Trends in Statics and Dynamics of Construction II: selected, peer reviewed papers from the 13th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings*. Bratislava, SR, 15. - 16. 10. 2015. Pfaffikon, Switzerland: Trans Tech Publications, 2016, pp. 135-139. ISBN 978-3-03859-323-2.
- SOKOL, M. et al.: Traffic Response Pattern of Cable-Stayed Bridge as a Comparison Tool for SHM. In: *39th IABSE Symposium – Engineering the Future*. Vancouver, Canada: September 21-23 2017, pp. 191-197. ISBN 978-3-85748-153-6.
- STN 73 6209: Zafážovacie skúšky mostov, SÚTN Bratislava, 09/1987.
- STRAUSS, A. et al.: Monitoring based nonlinear system modeling of bridge–continuous welded rail interaction. In: *Engineering Structures* [online]. 2018, 155, pp. 25-35. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.10.053. ISSN 01410296.
- TALICH, M.: The Effect of Temperature Changes on Vertical Deflections of Metal Rail Bridge Constructions Determined by the Ground Based Radar Interferometry Method. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [online]. 2019, 221. DOI: 10.1088/1755-1315/221/1/012076. ISSN 1755-1315.
- TARCHI, D. et al.: Remote monitoring of buildings using a ground-based SAR: Application to cultural heritage survey. In: *International Journal of Remote Sensing* [online]. 2000, 21(18), pp. 3545-3551. DOI: 10.1080/014311600750037561. ISSN 0143-1161.

## 12 Zoznam vybraných publikovaných prác autora

### Vedecké práce v domácich časopisoch

- SOKOL, M., MÁRFÖLDI, M., VENGLÁR, M., LAMPEROVÁ, K.: Evaluation of Performance Indicator of Railway Bridges Using Updated Finite Element Model. In: *Strojnícky časopis = Journal of Mechanical engineering*. Vol. 69, no. 2 (2019), pp. 89-96. ISSN 0039-2472 (2018). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85074459682; DOI: 10.2478/scjme-2019-0019.

### Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- LAMPEROVÁ, K., SOKOL, M., VENGLÁR, M., MÁRFÖLDI, M.: Použitie interferometrického radaru pri dynamickej zafážovacej skúške. In: *Juniorstav 2019 [elektronický zdroj]: zborník príspevků. 21. odborná konferencia doktorského štúdia s mezinárodní účastí. Brno, ČR, 31. 1. 2019 = Juniorstav 2019, proceedings of the 21st International Conference of doctoral Students. 1. vyd. Brno: ECON publishing, 2019, USB kľúč, pp. 292-297. ISBN 978-80-86433-71-4.*

SOKOL, M., VENGLÁR, M., ÁROCH, R., KOPÁČIK, A., KYRINOVIC, P., ERDÉLYI, J., ŠIŠMIŠOVÁ, Z., **LAMPEROVÁ, K.**: Traffic Response Pattern of Cable-Stayed Bridge as a Comparison Tool for SHM. In: *Engineering the Future [elektronický zdroj]: proceedings. 39th IABSE Symposium, September 21-23, 2017, Vancouver, Canada*. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2017, USB kľúč, pp. 191-197. ISBN 978-3-85748-153-6. V databáze: SCOPUS.

ŠIŠMIŠOVÁ, Z., SOKOL, M., VENGLÁR, M., **LAMPEROVÁ, K.**: Dynamic Tests of Two Large-Span Bridges for SHM. In: *Engineering mechanics 2018: book of full texts. 24th international conference. May 14-17, 2018, Svratka, Czech Republic*. Prague: Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Czech Academy of Sciences, 2018, pp. 749-752. ISSN 1805-8248. ISBN 978-80-86246-88-8. V databáze: WOS: 000465489800187; DOI: 10.21495/91-8-749.

VENGLÁR, M., SOKOL, M., **LAMPEROVÁ, K.**, MÁRFÖLDI, M.: Simple Supported Composite Beam – Preparation for Damage Assessment. In: *Engineering mechanics 2018: book of full texts. 24th international conference. May 14-17, 2018, Svratka, Czech Republic*. Prague: Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Czech Academy of Sciences, 2018, pp. 901-904. ISSN 1805-8248. ISBN 978-80-86246-88-8. V databáze: WOS: 000465489800225; DOI: 10.21495/91-8-901.

## Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

SOKOL, M., ÁROCH, R., VENGLÁR, M., **LAMPEROVÁ, K.**, ŠIŠMIŠOVÁ, Z.: Fatigue Effects on a Tower Structure Based on Dynamic Tests and More Precise Assessment of the Load. In: *ESaT 2018 [elektronický zdroj]: proceedings of the 3rd International Conference ESaT 2018. Tatranské Matliare, Slovak Republic, 12th - 14th September 2018*. Košice: Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, 2018, CD-ROM. [4] s. ISBN 978-80-553-2982-6.

SOKOL, M., **LAMPEROVÁ, K.**: Dynamic Response of Bridges Tested by Radar Interferometry. In: *New Trends in Dynamics of Structures: conference proceedings. 37th International Conference on Vibroengineering. Bratislava, Slovakia, 25-26th April 2019*. Kaunas: JVE International, 2019, pp. 138-143. ISSN 2345-0533. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85065862190. DOI: 10.21595/vp.2019.20674.

SOKOL, M., VENGLÁR, M., **LAMPEROVÁ, K.**, ŠIŠMIŠOVÁ, Z., ÁROCH, R.: Determination of basic dynamic characteristics of a tower structure from ambient vibrations. In: *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies III: proceedings of the 3rd International Conference ESaT 2018. Tatranské Matliare, Slovak Republic, 12-14 September 2018*. London: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019, pp. 241-246. ISBN 978-0-367-07509-5. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85068408809.

SOKOL, M., **LAMPEROVÁ, K.**, VENGLÁR, M., MÁRFÖLDI, M., PREKOP, L., KRCHŇÁK, M.: Radar interferometry for SHM purposes. In: *4th International Scientific Conference SPACE 2019 [elektronický zdroj]: Štrbské Pleso, Slovakia, November 13-15, 2019*. Londýn: EDP Sciences, 2020, online, [5] s., art. no. 00037. ISSN 2261-236X. V databáze: DOI: 10.1051/mateconf/202031000037.

## Abstrakty príspevkov zo zahraničných konferencií

MÁRFÖLDI, M., SOKOL, M., **LAMPEROVÁ, K.**, VENGLÁR, M.: Quantifying the Benefit of Structural Health Monitoring: SNP bridge in Bratislava, Slovakia. In: *Beton- und Stahlbetonbau*. Vol. 113, no. S2 (September 2018), pp. 143. ISSN 0005-9900 (2018: 0.966 - IF, Q3 - JCR Best Q, 0.428 - SJR, Q2 - SJR Best Q).