

# PROFESORSKÁ PŘEDNÁŠKA

POKROKY V METODÁCH HODNOCENÍ  
HISTORICKÝCH OCELOVÝCH MOSTŮ

**doc. Ing. PAVEL RYJÁČEK, Ph.D.**

ČVUT





České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta stavební

Czech Technical University in Prague  
Faculty of Civil Engineering

doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

**Pokroky v metodách hodnocení historických  
ocelových mostů**

**Advances in Methods for the Assessment  
of Historical Steel Bridges**

## **Summary**

This publication summarises the new fundamental knowledge used for the assessment of steel bridges, with a focus on historic steel bridges.

The first part presents the most important and new methods for diagnosing the condition of steel bridges. Their advantages and disadvantages are described, and the importance of corrosion weakening detection and methods to be applied to account for it are evaluated.

In the second part, the fundamental findings applicable to the assessment of the durability of steel bridges are described, allowing, for example, to refine wind loads, horizontal effects or to evaluate the residual life of the structure.

It is absolutely essential to use all available knowledge in the assessment process, as only in this way will we be able to save these structures and continue to use them for future generations.

## **Souhrn**

Publikace shrnuje významné nové poznatky používané pro hodnocení stavu ocelových mostů, se zaměřením na historické ocelové mosty.

V první části jsou uvedeny současné trendy pro diagnostiku ocelových mostů. Jsou popsány nové metody pro zjišťování materiálových vlastností, pro detekci korozních závad a pro detekci únavových trhlin.

V druhé části jsou popsány poznatky z jednotlivých metod, které mohou zásadním způsobem ovlivnit hodnocení odolnosti ocelových mostů. Jedná se o zohlednění korozního oslabení ocelové konstrukce, o vliv zatížení větrem, o predikci zbytkové únavové životnosti, o zohlednění tuhosti styčnicků příhradových mostů a o možnosti využití zatěžovacích zkoušek pro validaci numerických modelů.

V procesu hodnocení bezpečnosti a zbytkové životnosti mostů je záhodno využít všechny dostupné poznatky, neboť jen tak budeme schopni historicky významné ocelové mosty zachránit, prodloužit jejich životnost a dále je využívat i pro budoucí pokolení.

**Klíčová slova:**

Ocel, mosty, hodnocení, diagnostika, zatěžovací zkoušky, zatížení větrem, únava, korozie

**Key words:**

Steel, bridges, assessment, diagnostics, load test, wind load, fatigue, corrosion

# Obsah

<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>5</b>
<b>2. TRENDY V DIAGNOSTICE OCELOVÝCH MOSTŮ</b> .....	<b>8</b>
2.1. MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI HISTORICKÝCH MOSTŮ .....	11
2.2. DETEKCE KOROZNÍCH ZÁVAD .....	13
2.3. DETEKCE ÚNAVOVÝCH TRHLIN A KONCENTRACE NAPĚTÍ .....	15
<b>3. NOVÉ METODY HODNOCENÍ OCELOVÝCH MOSTŮ</b> .....	<b>18</b>
3.1. ZOHLEDNĚNÍ KOROZNÍHO OSLABENÍ PŘI POSOUZENÍ PRVKŮ .....	19
3.2. NOVÉ METODY PŘI ZATÍŽENÍ KONSTRUKCE VĚTREM .....	20
3.3. ÚNAVOVÁ ŽIVOTNOST KOROZNĚ POŠKOZENÝCH PRVKŮ .....	27
3.4. PREDIKCE TUHOSTI STYČNÍKŮ OCELOVÝCH MOSTŮ .....	31
3.5. VYUŽITÍ ZATĚŽOVACÍCH ZKOUŠEK PRO VALIDACI NUMERICKÝCH MODELŮ .....	33
3.5.1. <i>Experimentální práce – most v Petrově nad Desnou</i> .....	34
3.5.2. <i>Analýza chování puklovek – most Hybešova</i> .....	45
<b>4. ZÁVĚR</b> .....	<b>50</b>
<b>5. LITERATURA</b> .....	<b>51</b>
<b>AUTOR A CV</b> .....	<b>54</b>

# 1. Úvod

Mosty jsou součástí každé dopravní cesty, ať železniční, nebo dálniční a silniční nebo stezky pro cyklisty a chodce. Jsou velkými stavbami, které dotvářejí ráz krajiny nebo urbanismus města. V druhé polovině 19. století nastal rozmach železniční dopravy. Právě v té době vzniklo mnoho železničních mostů. Pro malá rozpětí to byly mosty kamenné nebo cihelné. V případě potřeby větších rozpětí to byly ocelové mosty. Jistá část těchto mostů slouží železničnímu provozu dodnes. Převážně se s nimi setkáme na lokálních tratích.



*Obr. 1 Železniční most pod Vyšehradem*

Tyto stoleté a starší mosty již splnily svoji úlohu z hlediska požadované životnosti, ale není možno je ve větším počtu v poměrně krátké době nahradit novými mosty. Z hlediska zachování industriálního kulturního dědictví je dokonce žádoucí vybrané reprezentanty zachovat a udržet je v náležitém stavebním stavu.

V mnoha případech se jedná o nádherné a ojedinělé mostní konstrukce, se kterými se ve světě běžně již neseťkáme. Jsou chloubou našeho mostního stavitelství z období Rakouska-Uherska, ale i z období první republiky. Vysoká odbornost tehdejších inženýrů, rozvinutý průmysl a kvalita práce při výrobě a stavbě ocelových mostů byla předpokladem, že tyto mosty se nám dochovaly v jistém počtu dodnes.

Je proto naší povinností toto industriální kulturní dědictví v přiměřené míře zachovat pro další generace. To však znamená, že se o vybrané reprezentanty starých ocelových mostů musíme postarat tak, aby mohly sloužit dopravě, byť v omezeném použití, po několik dalších desetiletí. Jednou z možností je

transformace již nepoužitelného mostu na lávku pro cyklisty. Stará ocelová mostní konstrukce může být snesena a přemístěna na jiné místo.



*Obr. 2 Visutý most ve Stádleci*

Ocelové mosty uvedené do provozu před 100 lety a dříve mají jiné konstrukční řešení než moderní mosty. Hlavní charakteristikou starých ocelových mostů je nýtování. Jednotlivé pruty, které nebylo možno vyrobít válcováním, tak byly zhotoveny pomocí nýtování. Ale i spoje v celé nosné konstrukci byly nýtované. Technologie svařování nastoupila do výroby ocelových mostů až v druhé polovině 20. století.



*Obr. 3 Detaily nýtovaných mostů (Holubov, Mokropsy)*

Nýtované ocelové mostní konstrukce se vyznačují specifickými konstrukčními detaily, které z hlediska údržby a oprav vyžadují v mnoha případech speciální technologie. V dřívější době se běžně používaly pro návrh konstrukce tzv. členěné pruty. Jsou to pruty, které se skládají ze dvou nebo více válcovaných



profilů, nejčastěji z úhelníků nebo U průřezů, do jednoho nosného průřezu. Mezi jednotlivými dílčími pruty jsou mezery, které odpovídají tloušťce plechů ve styčnicích. Tloušťka takové mezery se běžně pohybuje mezi 12 až 18 mm. Z hlediska údržby a oprav jsou tyto mezery problematické. Pro záchranu ocelových mostů s členěnými pruty byly v současné době vyvinuty technologie, pomocí kterých lze výše zmíněné mezery zbavit korozních produktů a připravit ocelový materiál pro novou protikorozní ochranu. Dalším specifickým znakem starých ocelových příhradových mostů je skutečnost, že každý prut má jiný průřez, protože se v tehdejší době v maximální míře šetřilo ocelovým materiálem bez ohledu na pracnost. Při návrhu příhradových ocelových mostů se používaly zjednodušené statické modely, které byly zvládnutelné tehdejšími výpočetními prostředky. Pro řešení vnitřně staticky mnohonásobně neurčitých konstrukcí byly používány přibližné statické modely, které v sobě obsahovaly jisté rezervy, kterých dnes dokážeme účelně využívat. Obdobně dnes dokážeme stanovit spolupůsobení jednotlivých nosných prvků ocelové konstrukce, což dříve nebylo možné.



*Obr. 4 Most ve Skochovicích*

Současné diagnostické metody nám poskytují informace o skutečné kvalitě ocelového materiálu, o korozních úbytcích, o případném únavovém porušení, o skutečném působení nýtovaných styčniců a o spolupůsobení jednotlivých prvků v celé mostní konstrukci. Na základě podrobného diagnostického průzkumu tak dokážeme jednak využít všech rezerv ocelové mostní konstrukce, ale také zohlednit poškození, která snižují její zatížitelnost. Navazující oblastí je pak proces hodnocení mostní konstrukce. Hodnocením rozumíme proces vedoucí ke stanovení únosnosti, zatížitelnosti, přechodnosti nebo případně zbytkové životnosti. Přestože pro návrh nových mostů můžeme bez větších problémů využít soubor evropských norem (Eurokódů), pro proces

hodnocení vede využití požadavků na nové konstrukce většinou k nevyhovujícím výsledkům, což je dáno zejména tím, že byly navrhovány podle starších předpisů na jiná zatížení. Přesto ale tyto konstrukce mohou být funkční a bez problémů i dále způsobilé fungovat v daných podmínkách. V tuto chvíli nastupují možnosti, které nám umožňují zpřesnit znalosti o mostní konstrukci, jejím statickém působení, geometrických a materiálových vlastnostech a jejím zatížení. Pro praktické použití pak lze využít poznatky předpisů [1], [2], [3] a [4]. V posledních letech v této oblasti proběhla řada prací, realizovaných týmem vedeným autorem této publikace, které umožnily získat nové poznatky, aplikovatelné v praxi pro hodnocení konstrukcí a následně i mimo jiné aktualizovat předpis [4]. Jejich představení a zhodnocení je uvedeno v následujících kapitolách.

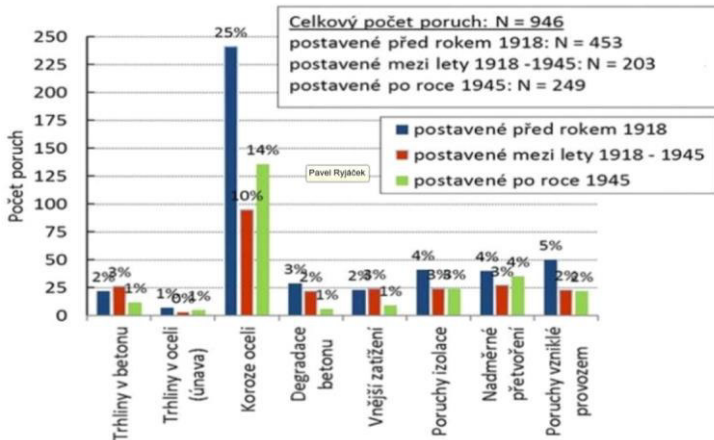
## **2. Trendy v diagnostice ocelových mostů**

Základní podmínkou pro hodnocení, návrh obnovy a provedení přiměřených konstrukčních opatření, je odpovídající znalost stavebně-historického a stavebně-technického stavu objektu, která umožňuje korektně rozhodnout o opravách nebo opatřeních k prodloužení životnosti stavby při současném zajištění její funkční způsobilosti a spolehlivosti.

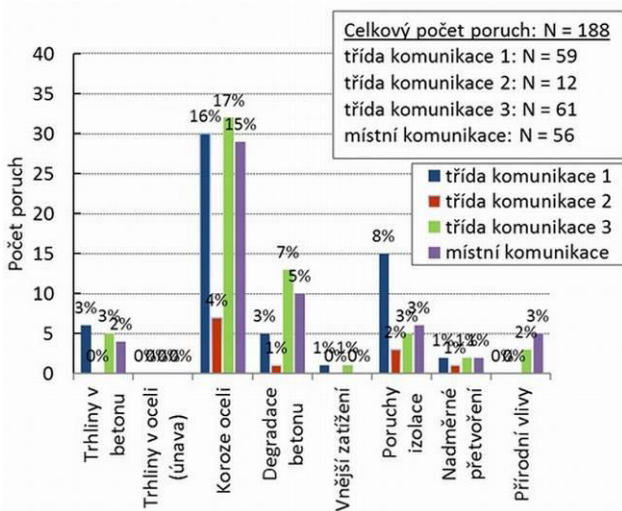
Ke zjištění stavebního vývoje konstrukcí památkově chráněného objektu se provádí stavebně-historický průzkum. Ke zjištění stavebně-technického stavu konstrukcí se provádí stavebně-technický průzkum a podle potřeby další specializované průzkumy. K posouzení vlivu okolního prostředí na životnost objektu může být potřebné provést geologický a hydrogeologický průzkum, průzkum vlhkostních poměrů či klimatologický průzkum. Vhodné metody stavebně-technického průzkumu se volí na základě předběžného hodnocení a s ohledem na památkovou hodnotu konstrukce nebo její části [2].

K poznání stavební historie památkově chráněného objektu a jeho aktuálního stavebně-technického stavu se mají používat především nedestruktivní metody průzkumu. Provedení destruktivních zkoušek je ale obvykle nezbytné, ale mají se přednostně provádět v nevýznamných částech, bez vlivu na nosnou konstrukci a její charakteristické prvky.

V případě zjištění vad a poruch má průzkum objektu poskytnout informace umožňující identifikaci jejich příčin. Charakter obvyklých vad lze ukázat na zhodnocení rozsáhlých skupin železničních a silničních mostů, s využitím revizních zpráv SŽ a systému BMS [6].



Obr. 5 Četnost poruch v závislosti na stáří konstrukce



Obr. 6 Četnost poruch v závislosti na třídě komunikace

V uplynulých letech bylo v rámci projektu NAKI prohlédnuto velké množství historických ocelových železničních i silničních mostů. Mimo popisu poruch a závad byly na většině prohlížených konstrukcích také provedeny nedestruktivní i destruktivní diagnostické zkoušky za účelem zjištění materiálových vlastností příslušné oceli. Obecně lze říci, že z hlediska četnosti poruch korespondují poznatky z provedených prohlídek se zjištěními

statistické analýzy. V následujícím odstavci jsou rekapitulovány nejvýznamnější poruchy, které byly zaznamenány v rámci provedených prohlídek a statistické analýzy poruch ocelových konstrukcí.

- Únavové trhliny se vyskytovaly téměř výhradně na železničních mostech. Valná většina zaznamenaných poruch byla v detailu plošného uložení mostnice na podélník. Dále byly detekovány poruchy ve výztuhách mostnicových sedel při centrickém uložení mostnice na podélník, v přípojích nasazených podélníků, či v detailech přímého upevnění koleje na ortotropní mostovce.
- Korozní oslabení je nejčastější poruchou ocelových mostů. Z poznatků provedených prohlídek lze konstatovat, že procentuální oslabení plochy hlavních nosných prvků je ve většině případů spíše nevýznamné, a to i v případech, kdy se stav konstrukce jeví na první pohled velice dramaticky. Největší korozní oslabení zpravidla postihuje podporové oblasti, kde se zadržují nečistoty a voda. Mezi závažnější korozní poruchy patří štěrbínová koroze v přípojích nýtovaných konstrukcí jak železničních, tak silničních mostů, kde může dojít z důvodu nárůstu korozních zplodin k tahovému namáhání nýtu. Povrchová koroze zpravidla způsobí větší procentuální oslabení u štíhlejších prvků, jako např. u prvků hlavního či příčného ztužení. Z tohoto důvodu jsou povrchovou korozí obecně více procentuálně oslabené mosty pozemních komunikací. Mezi další nejvíce oslabené prvky patří tenkostěnné profily mostin „Zorés“, používané na mostovkách nejstarších nýtovaných konstrukcí (viz obr. 7).
- Poměrně velké zastoupení mezi poruchami všech ocelových mostů mají nadměrné deformace spojené s nárazem vozidel, či z důvodu manipulace s mostem. Štíhlejší prvky příhradového ztužení z tohoto důvodu často vybočí se značnou vychylkou.
- U ocelových a ocelobetonových mostů byly pozorovány případy zatékání, či výluhů pojiva indikujících poruchy izolace. Tyto poruchy se velmi často vyskytují na železničních mostech s kolejovým ložem. Rozsáhlejší poruchy byly zaznamenány zejména na starších mostech se zabetonovanými nosníky. V případě betonových konstrukcí jsou poruchy izolace katalyzátorem následného procesu degradace.
- Byly zaznamenány případy degradace ocelových, betonových i dřevěných prvků konstrukce v oblasti mostního svršku železničních mostů či vozovky, v důsledku provozu na mostě.



*Obr. 7 Vybrané poruchy ocelových mostů: vlevo – korozie mostin „Zorés“ na mostě v Pamětníku, vpravo – trhliny v pásnici podélníku v detailu plošného uložení mostnic*

Materiálový průzkum historických materiálů má v závislosti na památkové hodnotě konstrukce zahrnovat všechny dostupné postupy, kterými se zkoumá chemické nebo fázové složení materiálu, jeho fyzikální vlastnosti, struktura, barevnost a stupeň poškození.

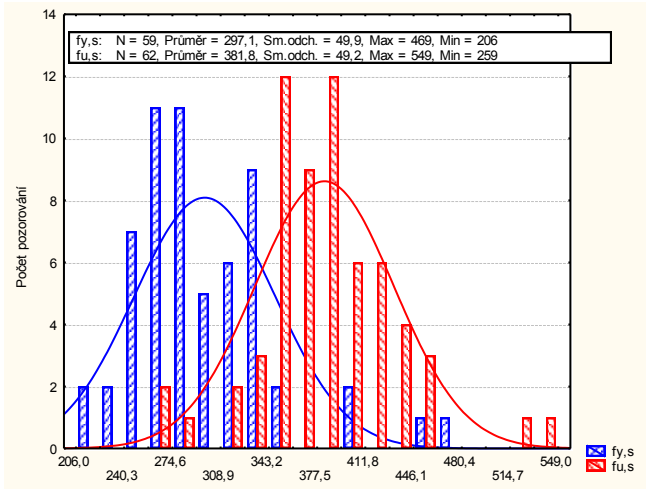
Kromě vlastních analytických metod zkoumání historických materiálů je nutné stanovit i složení a vlastnosti použitých materiálů a konstrukčních řešení, historické výrobní i řemeslné technologie či umělecké a umělecko-řemeslné postupy, které jsou většinou charakteristické pro určité časové období.

## **2.1. Materiálové vlastnosti historických mostů**

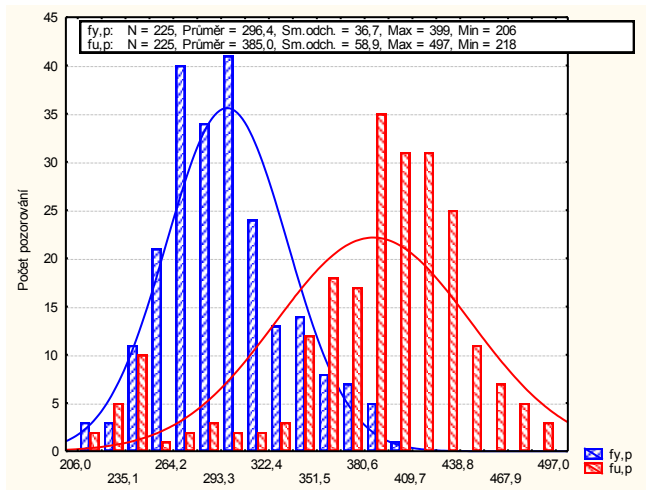
Za uplynulé roky byla v rámci projektu NAKI [6] provedena řada diagnostických průzkumů. Ve valné většině se jednalo o ocelové historické mostní konstrukce železniční i silniční. Byl proveden průzkum 35 mostů, ze kterých byly odebrány vzorky a provedeny materiálové zkoušky.

Jejich výsledky, a to zejména mez kluzu a pevnost, mohou být zajímavé jako určité vodítko při posuzování a hodnocení obdobných konstrukcí. Zobrazeny jsou mosty postavené mezi lety 1865 až 1947. Celkem se jednalo o 284 zkušebních vzorků.

Minimální mez kluzu byla zjištěna  $f_{y,min}=206$  MPa, průměrná hodnota meze kluzu pak byla  $f_{y,prům}=296$  MPa. Hodnota meze kluzu na úrovni 5% kvantilu při souhrnném zhodnocení všech vzorků  $f_{y,k}=241$  MPa. Je tedy patrné, že provedení materiálových zkoušek a diagnostického průzkumu může vést k daleko příznivějším výsledkům než aplikace tabulkových hodnot.



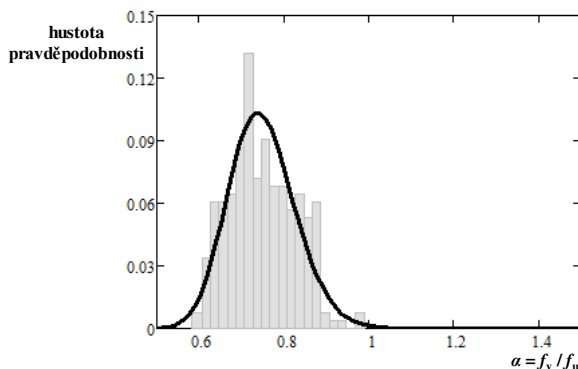
Obr. 8 Histogramy a odpovídající hustoty pravděpodobnosti meze kluzu a pevnosti zkoušených ocelí - svařková ocel.



Obr. 9 Histogramy a odpovídající hustoty pravděpodobnosti meze kluzu a pevnosti zkoušených ocelí - plávková ocel.

Pevnost materiálu  $f_u$ , jejíž odhad je obvykle výstupem měření nedestruktivních (NDT) měření, se využívá pouze v menším množství případů (posouzení nýtů, styčníků nebo průřezů s otvory). Obvykle je potřeba převést  $f_u$  na mez kluzu  $f_y$ .

Obr. 10 ukazuje histogram a odpovídající hustotu pravděpodobnosti součinitele  $\alpha = f_y / f_u$  zkoušených ocelí [5].



Obr. 10 Histogram a odpovídající hustota pravděpodobnosti součinitele  $\alpha$  zkoušených ocelí z období 1865-1947 [5]

## 2.2. Detekce korozních závad

Zjištění korozního oslabení je zásadním vstupem pro přepočet zatížitelnosti a ověření přechodnosti provozního zatížení. Z tohoto důvodu je potřebné koroznímu průzkumu věnovat dostatečnou pozornost a provést jej důkladně a podrobně. Na průzkum korozního oslabení může navazovat i diagnostický průzkum protikorozní ochrany, její stav a tloušťka, rozbor nebezpečných látek atd. Při korozním průzkumu se rozlišují následující oslabení:

- Lokální korozní oslabení – dílčí oslabení, které je svým rozsahem několikanásobně menší než hodnocený prvek či jeho část. Jedná se například o korozní důlek, prokorodování části průřezu prvku atd. Lokální oslabení je významným koncentrátorem napětí a může být významné pro hodnocení únavové životnosti.
- Průměrné korozní oslabení – jedná se o korozní oslabení, které odpovídá celkové průřezové ploše oslabení dílčí části průřezu (stěna, část pásnice atd.) podělené šířkou této části. Vyjadřuje v podstatě průměrné korozní oslabení na dílčí části prvku.

Při provádění průzkumu korozního oslabení se postupuje následujícím způsobem:

- Analýza pokladů konstrukce, sestavení osového schématu konstrukce s definováním jejich průřezů, rozdělení konstrukce na dílčí pruty nebo části s konstantním průřezem, jednoznačné označení prvků. Příprava

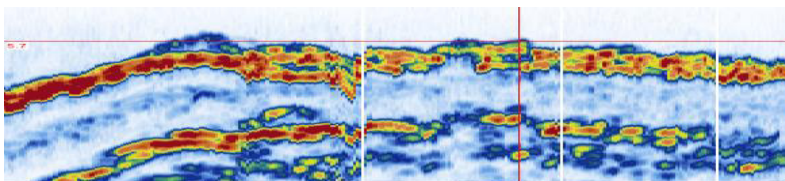
karet prvků pro jednotlivé zkoumané prvky, včetně schématu příčného řezu profilu v tištěné formě pro korozní průzkum

- Zpřístupnění konstrukce, a to horolezecky, odkrytím podlahových plechů, nájezdem vysokozdvizné plošiny, osazením dočasných lávek atd. Pro korozní průzkum je nepřijatelné hodnocení z dálky, konstrukce musí být přístupna tzv. „na dosah ruky“.
- Provedení korozního průzkumu. Při jeho provádění je nutno pečlivě mechanicky očistit korozně oslabená místa, a to včetně mechanického odstranění degradované oceli pod vrstvami koroze. Po odstranění korozních zplodin se na prvku stanoví lokální a průměrné korozní oslabení na všech dílčích částech průřezu samostatně.



*Obr. 11 Prokorodování diagonály před a po čištění, železniční most pod Vyšehradem*

Pro detekci korozního poškození se osvědčilo mimo používání ultrazvukových (UT) metod i využití metody Phased Array (PA). PA, tedy technologie fázového pole, využívá vícenásobných ultrazvukových prvků a elektronického zpoždování pulsů k vytváření zvukových paprsků, které se dají elektronicky směřovat, vychylovat a zaostřovat a lze tak dosahovat vysokých přesností, rychlosti kontroly a provádění vícenásobných úhlových kontrol. Technologie poskytuje lepší a komplexnější a zaznamatelné výsledky a doporučuje se ji provádět místo klasické UT zkoušky. Metodu PA lze použít pro zjištění únavových trhlin a vnitřních nehomogenit. Další aplikací je korozní mapování, to se provádí z opačné strany, než je korozní poškození a je ideální pro diagnostiku šterbinové koroze a vnitřní koroze dutých profilů.



*Obr. 12 Snímek definující oslabení diagonály, pořízený metodou Phased Array*



### 2.3. Detekce únavových trhlin a koncentrace napětí

V případě ocelových mostů, které vždy obsahují tažené nebo ohýbané prvky s velkým množstvím únavových detailů, je vždy nutno dbát jejich důkladnou prohlídku. Vznik trhlin lze očekávat v oblastech koncentrace napětí, tzn. v místech náhlé změny průřezu či změny rozměru svaru, křížení svarů, ve svarových přípojích styčnickových plechů, výztuh stěn nosníků nebo diafragmat komorových průřezů. Zvláštní pozornost je nutno věnovat ortotropním mostovkám. U nýtovaných konstrukcí jsou důležité oblasti nýtovaných styčnicků a místa, oslabená korozi, což generuje tzv. SCZ (stress concentration zones). V případě zjištěného poškození v těchto detailech je nezbytné provést jejich nejprve důkladnou diagnostiku za pomoci nedestruktivních metod, zdokumentovat tvar a délku únavové trhliny. Při pravidelném provádění preventivních prohlídek se většinou jedná o takovou délku trhliny, která umožňuje připravit opravu nebo výměnu porušeného prvku s případně omezeným provozem na mostě. Platí však zásada, že únavově porušený prvek se nesmí bez předchozího důkladného prověření svařovat. V případě zjištění únavové trhliny je nezbytné prohlédnout všechny obdobné konstrukční detaily.

Barva a nečistoty způsobují, že odhalení trhlin in situ je poměrně obtížný úkol. Proto je vždy u vytípaných kritických prvků potřeba ocelový prvek zbavit všech vrstev koroze, nečistot a případně i protikorozi ochrany. Únavová trhlina pak může být doprovázena poruchami ve vrstvě nátěru či může být doprovázena lokální korozi.

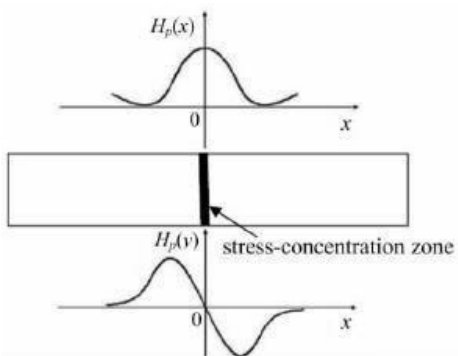
Klasické metody NDT zkoušení jsou pro tento účel většinou zdlouhavé a nákladné, a provádí se až při nalezení konkrétního defektu. Jednou z progresivních metod, používaných a rozvíjených týmem autora, je metoda magnetické paměti kovů, která dokáže lokalizovat poruchy nebo koncentrace napětí (SCZ, Stress Concentration Zones) ve feromagnetických materiálech. Objevitelem této metody je ruský expert A. A. Dubov, který v roce 1994 představil koncept magnetické paměti materiálu, kterou následně aplikoval do vývoje nedestruktivní metody. V roce 1999 představil princip a aplikaci této NDT metody pro potrubní technologie. Metoda magnetické paměti je založena na měření a analýze intenzit vlastního magnetického pole (tzv. SMFL-Self Magnetic Flux Leakage) feromagnetických látek.

Pokud se feromagnetická látka ochladí pod tzv. Curieho teplotu (pro železo 768 °C) vytvářejí se magnetické domény během krystalizačního procesu. Magnetické domény mají tendenci se vyrovnat ve směru geomagnetického pole Země a vytváří magnetickou strukturu, kterou ovlivňují nečistoty, způsob chlazení, mřížkové defekty, vnější napětí. Magnetické siločáry proudí uvnitř homogenního feromagnetického materiálu v uzavřených smyčkách. Při vzniku

mřížkových defektů nebo přítomnosti napětí v materiálu dochází k nevratným změnám doménových struktur. Mění se permeabilita materiálu, která vede ke změně intenzity vlastního magnetického pole. Tento jev zůstává i po odstranění vnějšího zatížení. V důsledku toho lze stanovit poškození feromagnetického materiálu měřením jeho povrchové distribuce SMFL. Metoda MMM je založena na fyzikálním principu nazývaném magnetomechanický efekt (magnetomechanical effect), který popisuje interakci mezi napětím a magnetismem.

Základní dva parametry popisující intenzitu magnetického pole jsou:

- tangenciální složka intenzity magnetického pole  $H(x)$  [A/m], která je rovnoběžná s povrchem vzorku
- normálová složka intenzity magnetického pole  $H(y)$  [A/m], která je kolmá na povrch vzorku



Obr. 13 Schéma SMFL distribuce v zóně koncentrace napětí [7]



Obr. 14 Skenovací zařízení

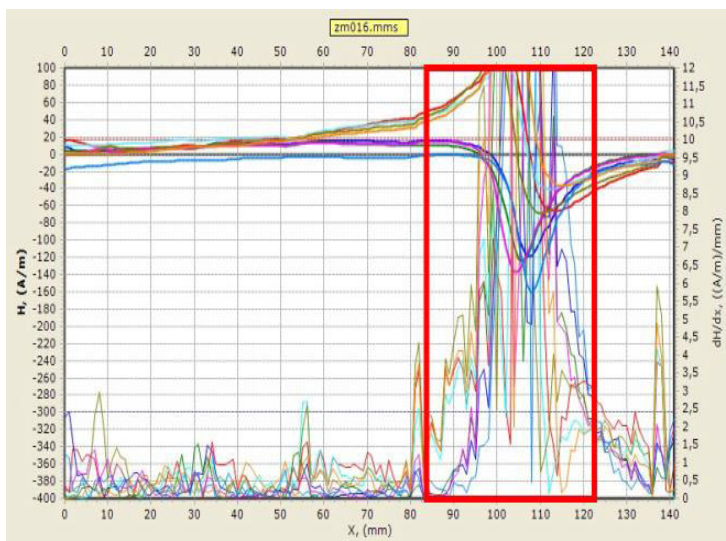
V zóně koncentrace napětí dosahuje tangenciální složka  $H_p(x)$  maximální hodnoty, zatímco normálová složka  $H_p(y)$  přechází z kladné do záporné hodnoty, viz obr. 13. Diagnostika metodou MMM se provádí pomocí měřicího zařízení, které se skládá z přijímacího zařízení typ a pojízdného skenovacího zařízení. Skenovací zařízení má různé konstrukční varianty. Nejčastější je použití vozíčku či samostatné sondy s detekcí ujeté vzdálenosti, viz obr. 14.

Měření je prováděno pojížděním po povrchu vyšetřovaného objektu. Aktuální měřené hodnoty jsou zobrazovány na monitoru přijímacího zařízení. Naměřené hodnoty lze uložit do paměti a následně naimportovat do počítače.

Zařízení zaznamenává tři veličiny:

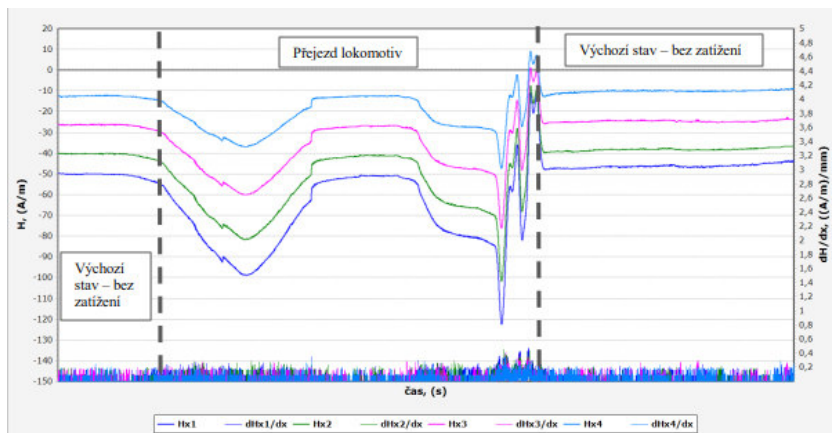
- H - intenzitu magnetického pole [A/m]
- $dH/dx$  - gradient magnetického pole [(A/m)/mm]
- Lx – měření skenované vzdálenosti [mm]

Hodnoty se následně zobrazí v přehledném grafu. V grafu u změny magnetického pole jsou vyznačeny 2 vodorovné úsečky. Slabá modrá udává průměrnou hodnotu změny magnetického pole, zatímco čárkovaná červená představuje hodnotu čtyř násobku průměrné hodnoty. Hodnoty pod touto úrovní můžeme označit pouze jako šum při měření. Ostatní hodnoty překračující tuto mez lze považovat za potenciální místa SCZ, viz obr. 15.



Obr. 15 Zjištění únavové trhliny metodou MMM, vlevo oblast bez trhliny, vpravo trhlina

V rámci statické a dynamické zatěžovací zkoušky mostu v km 3,706 pod Vyšehradem [7] byla sledována změna intenzity magnetického pole u vybraného detailu při působícím zatížení lokomotivy, viz obr. 16.



Obr. 16 Magnetogram - zatěžovací stav DZS3, přejezd 40 km/h, místo V-1-8P-1 – směr x, most pod Vyšehradem [7]

Dle získaného grafu lze sledovat, že při působícím zatížení dochází ke změně intenzity magnetického pole. Intenzita se mění dle mechanického namáhání prvku. Na základě provedeného měření byl tedy ověřen předpoklad, že intenzita magnetického pole má podobné chování jako mechanické namáhání prvku. Tato skutečnost se velmi dobře aplikuje u únavových trhlin, které se nacházejí ve stavy vysoké napjatosti, a je využívána i při dlouhodobém monitoringu výše uvedeného mostu.

### 3. Nové metody hodnocení ocelových mostů

V poslední době je hodnocení ocelových mostů věnována významná pozornost a vznikla i řada dokumentů a výzkumných zpráv, jejichž cílem je pomoci při procesu posuzování statické a únavové únosnosti stávající konstrukce [8], [9], [10], je připravován i nový Eurokód pro hodnocení existujících konstrukcí, dočasně vydaný jako [12]. Nicméně i přesto existují nejasnosti v tom, jak vzít v úvahu degradaci konstrukce, jak zhodnotit a spolehlivě stanovit stávající stav a dále pak zbývající životnost.

Tato kapitola poskytuje přehled nově dosažených znalostí výše zmíněné problematiky, a to na základě provedeného shrnutí poznatků plynoucích z doposud uskutečněných experimentů, měření, numerických analýz či analytických výpočtů.

### 3.1. Zohlednění korozního oslabení při posouzení prvků

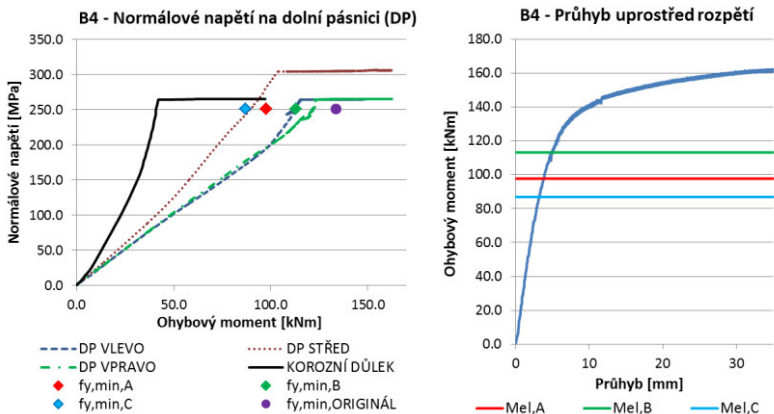
U existujících mostů můžeme rozeznávat povrchovou i hloubkovou korozi. Ztráta materiálu může mít za následek zmenšení průřezu a tím může zvýšit úroveň napětí pro dané zatížení nebo zvýšit rozsah napětí pro cyklické zatížení. Kromě toho, může vést ke snížení vzpěrné únosnosti prvků či ke vzniku křehkého lomu. Současně v korozních důlcích dochází k výraznému zvýšení koncentrace napětí. Obecně ale platí, že ztráta průřezu má za následek snížení průřezových parametrů.

Řada prací, např. [12], byla zaměřena na zjištění vlivu koroze na únosnost zkorodovaných nosníků, nicméně zatím nejsou k dispozici jednoznačné závěry použitelné pro projekční praxi. Proto byly v rámci projektu CESTI [13] provedeny laboratorní zkoušky na sadě ocelových podélníků pocházejících z nýtované mostní konstrukce z roku 1874 ze svářkové oceli. Vzorky s různou mírou degradace byly podrobeny statické zatěžovací zkoušce, jak je ukázáno na obr. 17.



*Obr. 17 Ocelový nýtovaný podélník během experimentu*

Na základě analýzy výsledků lze konstatovat, že přesnost určení zbývající momentové únosnosti značně závisí na způsobu zohlednění úbytku materiálu na prvku. Jako nejpřiléhavější metoda k řešení problému se jeví ta, při níž je pro výpočet průřezových charakteristik uvažována průměrná tloušťka horní pásnice, stojiny a spodní pásnice a změna polohy těžiště na příčném řezu I nosníku, viz obr. 18 (označeno jako B). Co se týká lokálních účinků, měření potvrdila značný nárůst normálových napětí v oblasti korozních důlců (viz černá křivka na obr. 4 vlevo). Napětí zde roste rychleji a materiál začíná plastizovat při menších hodnotách působícího zatížení. Tento faktor je významný zejména pro hodnocení účinku únavy.



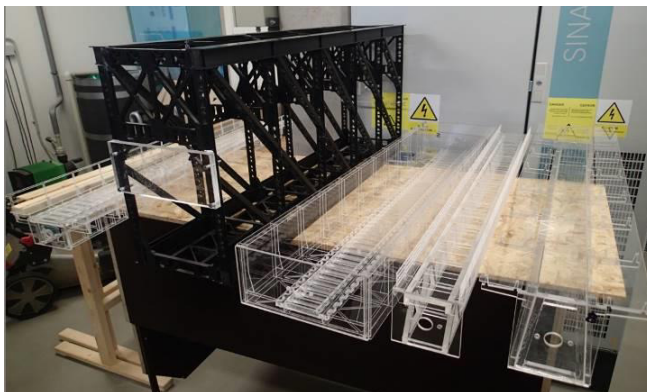
Obr. 18 Vývoj normálového napětí na vzorku č.4 (vlevo) a závislost průhybu na ohybovém momentu s vyznačenou vypočtenou momentovou únosností vzorku (vpravo)

### 3.2. Nové metody při zatížení konstrukce větrem

V nedávné době byly provedeny přepočty zatížitelnosti a přechodnosti několika významných historických ocelových železničních mostů, např. Červená, Prostřední Žleb, Hracholusky. U všech těchto zmíněných mostů a u mnoha dalších historických konstrukcí se vyskytly při přepočtu problémy s návrhovou hodnotou zatížení větrem a hodnotou brzdných a rozjezdových sil, které výrazně snižovaly zatížitelnost, i když reálné problémy nebyly ve většině případů za více než 100 let zaznamenány. Dalším významným problémem byla také kombinace zatížení větrem a dopravou, a to především v mezním stavu překlopení. V rámci snahy zachovat tyto mosty byla provedena řada měření a vypracována metodika pro přesnější stanovení zatížení větrem na konstrukce a jejich kombinace s účinky zatížení dopravou.

Hlavními cíli výzkumu, vedeného autorem [15], bylo zpřesnit hodnoty součinitele zatížení větrem pro charakteristické typy ocelových mostních konstrukcí, ověřit vliv turbulentního proudění a blízkosti terénu pod konstrukcí na její odezvu na zatížení větrem. Hlavními výstupy výzkumu jsou opravné součinitele charakteristických hodnot zatížení větrem a kombinační součinitele pro zatížení větrem při současném působení zatížení dopravou v návrhových situacích.

V roce 2016 a 2017 byla provedena řada měření ve větrném tunelu na modelech osmi reprezentativních typů ocelových železničních mostů, viz tab. 1 a obr. 19, kde lze očekávat problémy s únosností či stabilitou. Modely byly vyrobeny na 3D tiskárně či z plastových desek tak, aby je bylo možné vhodně osadit do stojanu aerodynamických vah.



Obr. 19 Modely mostů zleva: Brniště, Prostřední Žleb hlavní pole, Babín, Znojemský viadukt, Jizera

Tab. 1 Tabulka reprezentativních typů mostů

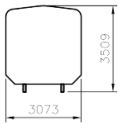
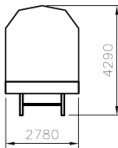
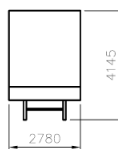
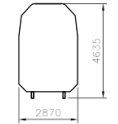
Most č.	Popis mostu	Název mostu
1	Příhradový most s dolní prvkovou mostovkou	Děčín, Prostřední Žleb, hlavní pole
2	Příhradový most s mezilehlou prvkovou mostovkou	Červená nad Vltavou
3	Příhradový most se zapuštěnou prvkovou mostovkou	Most Hracholusky (poskytl TOPCon s.r.o.)
4	Příhradový most s horní mostovkou a kolejovým ložem, moderního typu	Znojemský viadukt
5	Plnostěnný most trémový s dolní prvkovou mostovkou	Babín – Nymburk seřadovací nádraží
6	Plnostěnný most trémový s mezilehlou prvkovou mostovkou	Děčín Prostřední Žleb, krajní pole
7	Plnostěnný most trémový bez mostovky, uložení mostnic horní přímo na hlavní nosníky	Most Brniště na trati Česká Lípa – Liberec
8	Plnostěnný most trémový s přímým upevněním kolejnic na horní mostovku	Most Jizera na trati Nymburk – Mladá Boleslav

Měření byla provedena jak pro samostatnou mostní konstrukci, tak pro konstrukci zatíženou dopravou. Za tímto účelem byly vyrobeny modely čtyř reprezentativních kolejových vozidel. Pro simulaci dopravy na lokálních tratích byla vybrána motorová souprava Regionova řady 814-914, pro reprezentaci příměstské dopravy byla vybrána souprava City Elefant, což je zároveň nejvyšší kolejová souprava pohybující se na dopravní síti ČR. Jako

zástupci nákladní dopravy byl vybrán vagón KILS 12, což je nejvyšší a nejlhčí nákladní vagón používaný dopravci na síti ČR, a vůz SGS s kontejnerem High Cube pro svůj nepříznivý aerodynamický tvar. Z důvodu tvarové podobnosti lze model vozu KILS 12 použít pro velkou část vozů osobní dopravy, které nepatří do řádné standardizované soupravy a většinou jsou součástí souprav Rx a Ex, viz tab. 2.

Experimentální měření byla provedena v klimatickém větrném tunelu, který se nachází v Centru Excellence v Telči, který je součástí Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i. Jedná se o uzavřený cirkulační aerodynamický tunel typ Göttingen. Tunel je rozdělen na dvě pracovní sekce; aerodynamickou uzpůsobenou k aerodynamickému měření účinku větru na konstrukce a klimatickou, která se využívá k synergickému modelování klimatických faktorů jako je teplota, déšť, mráz i sálavé teplo.

Tab. 2 Tabulka reprezentativních kolejových vozidel

Souprava	Výška	Váha	Schéma soupravy
	[m]	[t/m]	
KVD 1 Regionální tratě obsluhované výhradně motorovými jednotkami 814 a jim podobnými (typ Regionova)	3,509	1,39	
KVD 2 Tratě pro osobní i nákladní dopravu bez dvoupatrových jednotek příměstské dopravy a s vyloučenou kontejnerovou dopravou (odpovídá velikosti Kils 12)	4,290	1,07	
KVD 3 Tratě pro osobní i nákladní dopravu bez dvoupatrových jednotek příměstské dopravy (odpovídá SGS + High Cube)	4,145	1,53	
KVD 4 Ostatní tratě (odpovídá jednotkám City Elephant apod.)	4,635	1,96	

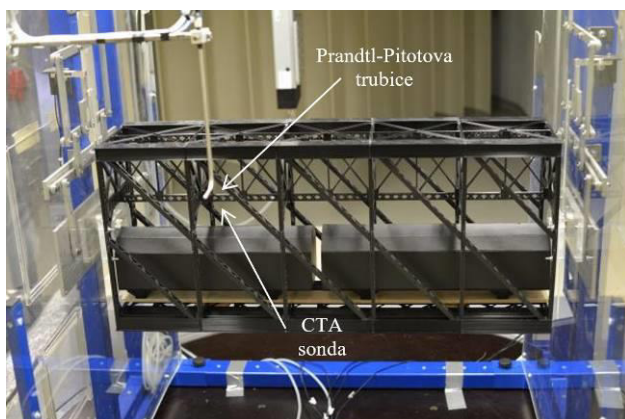
Ve větrném tunelu byla provedena následující měření:

- ustálené, laminární proudění,



- turbulentní proudění,
- vliv vzdálenosti terénu od mostní konstrukce,
- vizualizace proudění větru skrz konstrukci a jejího obtékání,
- vektory rychlostí pomocí PIV metody,
- vliv vzdálenosti nosníků na zatížení závětrného nosníku.

Měření byla provedena pro zatížený a nezatížený most s kolejovou dopravou a pro natočení mostu oproti proudění větru od  $-10^\circ$  do  $10^\circ$ . Modely byly umístěny v aerodynamických vahách, viz obr. 20. Ty jsou schopny za pomoci tří tenzometrů měřit odporové síly, vztlakové síly a otáčivý moment. Tyto síly bylo posléze možné pomocí měřených hodnot rychlosti proudění větru v tunelu, referenční plochy modelu mostu a klimatických podmínek převést na příslušné součinitele zatížení  $C_D$ ,  $C_L$ ,  $C_M$ . Referenční plocha pro každý moment byla stanovena v souladu s postupy dle ČSN EN 1991-1-4, kap. 8.



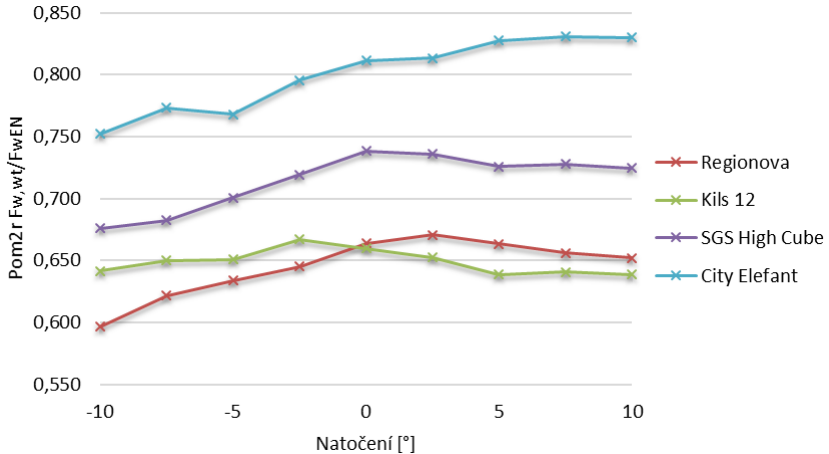
Obr. 20 Model mostu Prostiřední Žleb hlavní pole s modelem vozu KILS 12

Výsledky měření ve větrném tunelu byly porovnány pro každý typ mostu s postupy uvedenými v [14]. Jednotlivé metody dle normy se především liší ve způsobu určení součinitele síly  $c_{fx}$  a ve velikosti referenční zatěžovací plochy  $A_{ref}$ , na kterou je zatížení větrem aplikováno. Jako optimální byla vyhodnocena metoda, značená dále jako M4, kdy se stanovuje součinitel  $c_{fx}$  zvlášť pro mostovku dle grafu 8.3 [14] a zvlášť pro všechny rovinné příhrady dle grafu 7.33 [14].

Jelikož z větrného tunelu byl stanoven vždy jeden součinitel zatížení  $c_{fx}$  pro celou konstrukci mostu i s případnou dopravou, nebylo možné porovnávat přímo součinitele zatížení, ale bylo potřeba stanovit jednotný součinitel tlaku a vypočítat celkové zatížení na most ve vodorovném směru.

Dále byla porovnána data naměřená pro laminární a turbulentní proudění ve větrném tunelu. Měření tohoto vlivu již nebyla provedena v tak velkém rozsahu, ale pouze pro mosty Červená, Brniště a Prostřední Žleb hlavní pole, a to bez přítomnosti dopravy nebo s vozem KILS 12. Pro všechny konfigurace vyšly hodnoty naměřených součinitelů ve vodorovném směru nižší pro turbulentní proudění. Vliv vzdálenosti terénu od mostu byl také měřen při turbulentním proudění. Velikost součinitele zatížení rostla s klesající vzdáleností od překážky, ale nepřekonalala hodnotu naměřenou při laminárním proudění ve větrném tunelu.

Korekční součinitel charakteristické hodnoty zatížení větrem na most byl stanoven jako poměr sil vypočtený z dat naměřených ve větrném tunelu a z metody M4 pro stejný součinitel tlaku. Byly stanoveny redukční součinitele pro vodorovný i svislý směr. Na základě znalosti typu nosné konstrukce, charakteru kolejové dopravy a poměru proudění větru v dané oblasti (úhel odklonu proudění větru od vodorovného směru) je možné z grafu získat korekční součinitel, kterým je možno redukovat charakteristickou hodnotu zatížení větrem na konstrukci. Na obr. 21 je příklad redukčních součinitelů ve vodorovném směru pro most Brniště. Jestliže se most nachází na lokální trati bez přítomnosti nákladní dopravy, lze použít redukční součinitel pro vozy KILS 12 nebo Regionova.



Obr. 21 Korekční součinitel zatížení větrem ve vodorovném směru pro trámový most bez mostovky s přímým uložením mostnic na nosníky

Tab. 3 pak ukazuje celý soubor korekčních součinitelů, odvozený na základě popsaných měření.

Tab. 3 Soubor korekčních součinitelů pro zatížení ve vodorovném směru ( $F_D$ )

Typ konstrukce	Odklon větru	Most bez dopravy	KVD 1 (Regionova)	KVD 2 (Kils 12)	KVD 3 (SGS + High Cube)	KVD 4 (City Elephant)
		$C_{kor,x} [-]$				
Příhradový most s dolní prvkovou mostovkou	$\pm 5^\circ$	1,03	0,93	0,93	1,02	1,12
	$\pm 10^\circ$	1,13	0,95	0,95	1,04	1,12
Příhradový most s mezilehlou prvkovou mostovkou	$\pm 5^\circ$	1,11	0,90	0,97	1,02	1,08
	$\pm 10^\circ$	1,14	0,91	0,99	1,03	1,10
Příhradový most se zapuštěnou prvkovou mostovkou	$\pm 5^\circ$	1,01	0,80	0,84	0,96	1,05
	$\pm 10^\circ$	1,09	0,81	0,86	0,96	1,05
Příhradový most s horní mostovkou a kolejovým ložem, moderního typu	$\pm 5^\circ$	1,06	0,80	0,80	0,84	0,93
	$\pm 10^\circ$	1,14	0,80	0,80	0,85	0,93
Plnostěnný most trémový s dolní prvkovou mostovkou	$\pm 5^\circ$	1,04	0,68	0,81	0,94	1,01
	$\pm 10^\circ$	1,04	0,71	0,87	0,96	1,04
Plnostěnný most trémový s mezilehlou prvk. mostovkou	$\pm 5^\circ$	1,06	0,70	0,71	0,79	0,87
	$\pm 10^\circ$	1,10	0,70	0,71	0,79	0,87
Plnostěnný most trémový bez mostovky, uložení mostnic na hlavní nosníky	$\pm 5^\circ$	0,83	0,67	0,67	0,74	0,83
	$\pm 10^\circ$	0,91	0,67	0,67	0,74	0,83
Plnostěnný most trémový s přímým upevněním kolejnic na horní mostovku	$\pm 5^\circ$	1,05	0,71	0,71	0,80	0,86
	$\pm 10^\circ$	1,10	0,71	0,71	0,80	0,86

V rámci pravděpodobnostního hodnocení naměřených dat ve větrném tunelu byl optimalizován kombinační součinitel  $\psi$  pro mezní stav STR a ověřen součinitel spolehlivosti  $\beta$  pro mezní stav EQU. Vstupní hodnoty pravděpodobnostní analýzy byla data maximálních rychlostí větru ze tří meteorologických stanic, data naměřená ve větrném tunelu a data o železniční dopravě na celé železniční síti ČR pro měsíce květen a listopad roku 2016. Meteorologické stanice byly vybrány tak, aby pokryly: a) nížinou oblast v

kategorii terénu II (stanice Mošnov), b) horskou oblast v kategorii terénu V (stanice Svatouch) a c) oblast v kategorii terénu III (stanice Ruzyně).

Pro vyhodnocení dat o kolejové dopravě byly vybrány tři traťové uzly: a) s vysokou intenzitou dopravy na koridorové trati (Český Brod), b) se střední intenzitou dopravy a velkým vlivem nákladní dopravy (Most) a c) lokální trať bez vlivu nákladní dopravy (Holubov).

Optimalizace kombinačního součinitele  $\psi$  pro mezní stav STR byla rozdělena na výpočet zatížitelnosti a přechodnosti pro mosty mladší a starší než 30 let. Zatížení kolejovou dopravou bylo uvažováno jako dominantní a zatížení větrem jako vedlejší. Pro mosty mladší než 30 let byl použit součinitel zatížení pro kolejovou dopravu dle platné ČSN EN  $\gamma_Q = 1,45$  a model zatížení LM71. Pro mosty starší než 30 let byl použit model LM71 se součinitelem zatížení  $\gamma_Q = 1,3$  a model skutečného vlaku se součinitelem zatížení  $\gamma_Q = 1,1$  dle platného metodického pokynu SŽDC pro výpočet zatížitelnosti stávajících mostů. Součinitel zatížení pro vítr byl ve všech případech uvažován jako  $\gamma_W = 1,5$ . V Tab. 4 jsou zobrazeny optimalizované hodnoty kombinačního součinitele pro všechny návrhové situace.

V mezním stavu EQU byla ověřena spolehlivost zpřesněného modelu tlaku větru. Byla ověřena kombinace zatížení dopravou a větrem jako nejneprůzračnější kombinace pro stabilitu mostu. Z dat o kolejové dopravě na železniční síti ČR byly získány četnosti lehkých vlaků. Četnosti byly rozděleny tak, aby korelovaly s váhami nenaložených vybraných vozů. Celkem bylo vyhodnoceno 360 situací pro 3 větrné oblasti, 3 třídy intenzity dopravy, 5 typů lehkých vlaků a 8 reprezentativních typů mostů. Pro porovnání byla vyhodnocena i spolehlivost návrhu dle Eurokódu.

Tab. 4 Doporučené hodnoty kombinačního součinitele  $\psi_{w0}$  ( $\gamma_W = 1,5$ )

Alternativa ověření spolehlivosti	Model zatížení dopravou	Součinitele tlaku větru	$\psi_{w0}$
Návrh a stanovení zatížitelnosti a přechodnosti - mosty mladší než 30 let	LM71, přechodnost	větrný tunel	0,6
	$\gamma_Q = 1,45$	ČSN EN 1991-1-4	
Stanovení zatížitelnosti a přechodnosti - mosty starší než 30 let	LM71, přechodnost	větrný tunel	0,5
	$\gamma_Q = 1,3$	ČSN EN 1991-1-4	
	Skutečný vlak,	větrný tunel	0,75
	$\gamma_Q = 1,1$	ČSN EN 1991-1-4	0,65

Kromě ověření hodnoty součinitele spolehlivosti  $\beta$  je dalším výstupem spolehlivostní analýzy a analýzy dat o dopravě hmotnost nezatíženého vlaku

v závislosti na intenzitě dopravy na dané trati. V tab. 5 jsou uvedeny charakteristické hodnoty tíhy nezátíženého vlaku.

Tab. 5 Charakteristické hodnoty nezátížených vlaků podle intenzity železniční dopravy

Intenzita železniční dopravy	Charakteristická hodnota tíhy nezátíženého vlaku [kN/m]
Vysoká, střední	11
Nízká	14

### 3.3. Únavová životnost korozně poškozených prvků

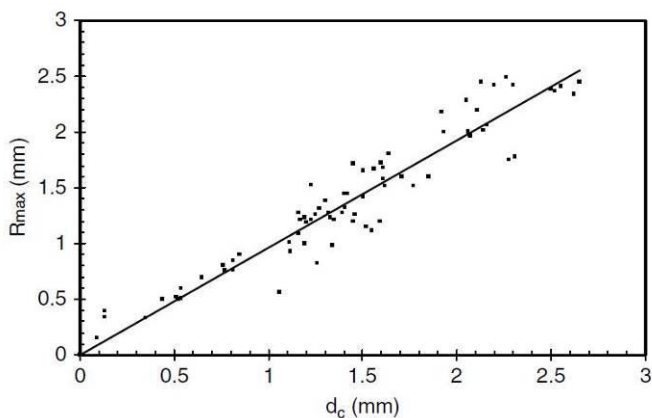
V případě, že ztráta materiálu je lokální, jako je tomu u důlkové koroze, i malé povrchové diskontinuity mohou způsobovat zvýšení koncentrace napětí, která může vést ke zvýšení citlivosti prvků na únavu. Studie korozních důlků ukazuje, že trhlinka nutně nevzniká na dně důlku. Kde trhlinka v důlku vzniká, záleží na jeho tvaru (poměr stran), zatížení a korozním prostředí. Degradace působením koroze je samozřejmě problematická pro všechny prvky konstrukcí vystavených nepříznivým povětrnostním vlivům, ale pro přípoje svařované či nýtované těchto prvků je ještě významnější.

Na únavové chování zkorodovaných ocelových plechů, tedy základních komponent ocelové konstrukce, byla doposud vypracována řada studií, ať již na prvcích odebraných ze skutečných degradovaných konstrukcí, či na vzorcích s uměle vytvořeným korozním oslabením [16], [17], [18], [19] až [22]. Rozbory dosažených výsledků ukazují, že výskyt korozních důlků a drsnost povrchu výrazně snižuje únavovou životnost. Rychlá změna příčného řezu poblíže korozního důlku vyvolává koncentraci napětí, která způsobuje vznik a šíření únavové trhliny (viz obr 18). Únavový lom nastává obvykle v důsledku interakce několika míst korozních důlků, nejen v důsledku jediného důlku. Zejména hluboké a úzké důlky se projevují snížením únavové životnosti.



Obr. 22 Únavové poškození zkoušeného vzorku [10]

Uvedené lze ukázat na příkladu studie [18], kde autoři podrobili vzorky z pásnic a stojin silně zkorodovaných ocelových nosníků cyklickému zatížení a měřili drsnosti zkorodovaných povrchů. Na základě experimentů odvodili lineární vztah mezi celkovou hloubkou koroze a maximální drsností povrchu ocelových prvků (viz obr. 24). Různým hodnotám maximální drsnosti poté přiřadili třídy konstrukčních detailů stanovených v normě BS 5400. Následně lze na základě průměrné hodnoty oslabení  $d_c$  zjistit hodnotu maximální drsnosti povrchu  $R_{max}$  jejím odečtením z grafu. V tab. 6 jsou různým hodnotám drsnosti  $R_{max}$  přiřazeny kategorie detailu B až W, včetně hodnoty sklonu křivky detailu  $m$ . Je patrné, že dopad do únavové životnosti je poměrně významný.



Obr. 23 Lineární závislost průměrného korozního oslabení a maximální drsnosti povrchu [20]

Tab. 6 Kategorie detailů (dle BS 5400) odpovídající různým hodnotám drsnosti zkorodovaného povrchu  $R_{max}$

Kategorie detailu	$m$	$R_{max}$ [mm]
B	4,0	-
C	3,5	0,78
D	3,0	2,00
E	3,0	2,05
F	3,0	2,30
F2	3,0	2,40
G	3,0	2,70
W	3,0	2,85

Z hlediska konstrukčních detailů stojí za zmínku experiment [19], kde byl zkoušen detail příčné výztuhy přivařený koutovými svary k plechu zatíženého tahovou silou, který spadá do kategorie 86. Původní tloušťka taženého plechu a přivařený výztuhy byla 4,5 mm, přičemž průměrná hodnota korozního oslabení se u všech vzorků pohybovala okolo 2,5 mm. Následná zkouška na únavu prokázala značný pokles na kategorii detailu cca 65.

U nýtovaných mostů jsou často právě nýty nejdříve napadeny korozi. Tření ve stykových plochách je způsobeno předpětím v nýtu, které je do něj vneseno během chlazení nýtu při výrobě spoje, kde toto předpětí je významné z toho hlediska, že redukuje špičky napětí v okolí otvorů jednotlivých připojených prvků. Experimenty ukazují, že při 22% ztrátě objemu hlavy nýtu tyto nýty přenesou 90 % z počátečního předpětí. Únavová zkouška navíc ukázala nízký následek redukce předpětí na trvanlivost spoje.

U nýtovaných mostů se dle [8] rozlišují 3 skupiny významných detailů citlivých na únavu. Jedná se o skupiny W I, W II a W III, přičemž každá z nich odpovídá jiné kategorii detailu dle typu oceli:

- svářková a plávková ocel:
- WI ...  $\Delta\sigma_c = 112$  MPa, WII ...  $\Delta\sigma_c = 85$  MPa, WIII ...  $\Delta\sigma_c = 71$  MPa
- ocel třídy 37/52:
- WI ...  $\Delta\sigma_c = 163$  MPa, WII ...  $\Delta\sigma_c = 122$  MPa, WIII ...  $\Delta\sigma_c = 100$  MPa

Skupině W I odpovídají konstrukční části neoslabené otvory. Do skupiny W II spadají konstrukční části obsahující korozní důlky, dále nýtované spoje plechů s oboustrannými příložkami, spojitý nýtovaný přípoj stojiny a krčního úhelníku nosníku a rovněž spojitý nýtovaný přípoj krčního úhelníku a pásnice nosníku. Skupina detailů W III zahrnuje nýtované přípoje prvků příhradových konstrukcí, nýtované přípoje s jednostrannými příložkami, nýtovaný přípoj ztužujících prvků k tažené pásnici nosníku a prvky se zesilujícími plechy.

Jasný vztah míry koroze u nýtovaných detailů a spojů však nebyl dosud publikován. Proto pro zjištění vlivu koroze na detaily nýtovaných spojů byly týmem autora provedeny zkoušky na vzorcích, odebraných z existující konstrukce ocelového železničního mostu v Holubově. Výběr byl zaměřen tak, aby byla k dispozici variabilita v úrovni korozního poškození. Jednalo se o vzorky nýtovaných spojů, které byly vyříznuty z dolního pásu příhradového nosníku a dle stupně korozního oslabení byly rozděleny do skupin:

1. skupina - bez koroze, pouze změna barvy povrchu;
2. skupina - střední úroveň korozního oslabení, zejména na horním povrchu horního plechu a na hlavách nýtů, průměrná hloubka (0,5-1,5 mm) korozních důlků, rozsah tloušťky korozního oslabení 1 - 2 mm;

- 3. skupina - vysoká úroveň korozního oslabení, zejména na horním povrchu horního plechu a na hlavách nýtů, průměrná hloubka (2 - 3 mm) korozních důlků, rozsah tloušťky korozního oslabení v rozmezí 2 - 4 mm;
- 4. skupina - vzorky s chybějícím nýtem, žádné měřitelné korozní oslabení.

Vzorky skupiny 1, celkem 2ks, byly osazeny velkým množstvím tenzometrů, a to za účelem validace numerického modelu, dále pak i induktivními snímači dráhy. Vzorky skupiny 2, celkem 11 vzorků, byly osazeny dvěma tenzometry, a to zejména pro identifikaci vzniku únavové trhliny. Použity byly tenzometry HBM, snímače dráhy (LVDT) – typ DTA-10C-CA; ústředna typu Dewetron Dewe 5000.

Zkušební vzorky byly uchyceny k dynamickému zkušebnímu stroji a zatěžovány pulsující tahovou silou, viz Obr. 25. Konec únavové životnosti byl dán dosažením kritické délky trhliny a porušením vzorku.

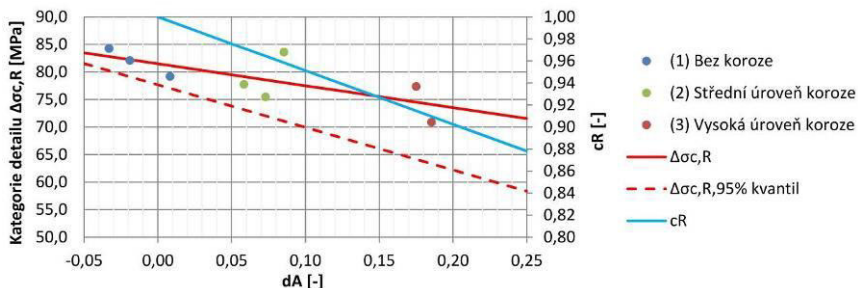


*Obr. 24 Vzorek při dynamické zkoušce, pohled na porušení a vzorek*

Korozní oslabení se většinou skládá z rovnoměrné a nerovnoměrné složky. Nerovnoměrná složka znamená lokálně zvýšenou hloubku korozního oslabení ve formě korozního důlku. Dle výsledků uvedených v tabulce 1, lze pozorovat sestupný trend v hodnotě kategorie detailu při rostoucí úrovni korozního úbytku. Při uvážení rovnoměrné složky korozního oslabení a aplikaci regresní



analýzy lze redukcí kategorie detailu vyjádřit dle vztahu 1 a 2, závislost mezi kategorií detailu a úrovní korozního oslabení je znázorněna na obr. 25.



Obr. 25 Závislost mezi kategorií detailu a úrovní korozního oslabení

$$\Delta\sigma_{c,R} = \Delta\sigma_c \cdot c_R \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

$$c_R = (1 - 0,484 \cdot d_A) \quad [-] \quad (2)$$

kde:  $\Delta\sigma_c$  je původní kategorie detailu prvku bez korozního oslabení,

$d_A$  je úroveň korozního oslabení, stanovená jako podíl plochy zkorodované části příčného řezu k původní ploše příčného řezu u prvků namáhaných normálovou silou, popřípadě u prvku zatíženého kombinací ohybu a normálové síly jako podíl plochy zkorodované části příčného řezu posuzované části prvku (např. pásnice) k původní ploše části příčného řezu,

$c_R$  je redukční součinitel.

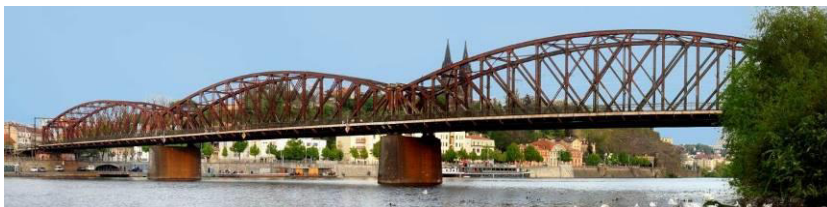
Tento vztah byl implementován do novelizace předpisu [4].

### 3.4. Predikce tuhosti styčníků ocelových mostů

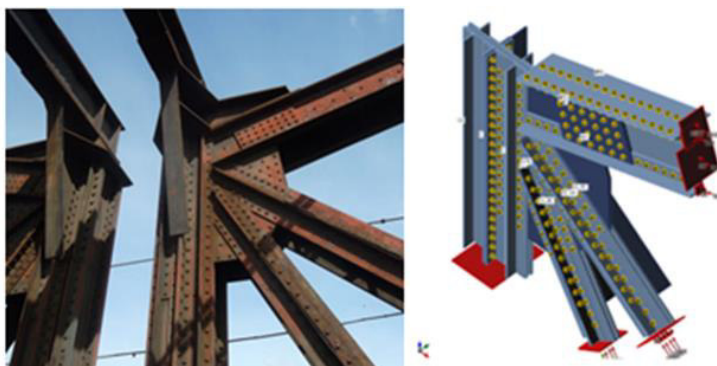
Tuhost styčníků ve výpočetním modelu významným způsobem ovlivňuje vnitřní síly, a to zejména ohybové momenty na konstrukci. Tento vliv je nejvýznamnější pro prvky mostovky a pro příhradové konstrukce. Z tohoto důvodu v odůvodněných případech (tedy pokud tuhost styčníků má vliv na zatížitelnost nosné konstrukce) je doporučeno modelovat styčníky tak, aby jejich tuhost odpovídala reálnému působení. Toho lze docílit nejlépe nej přesněji analýzou podrobných nelineárních modelů styčníků, které zohlední chování spojovacích prostředků, lokální plastifikaci v jejich okolí a detailní chování částí styčníku. Výsledně zjištěnou počáteční tuhost styčníku lze následně zavést do výpočtového modelu.

Standardní analýza ve FEM programech je velmi pracná, nicméně jako slibná a přijatelně pracná metoda se jeví metoda CBFEM, implementovaná např. v programu IDEA Connection. V posledních letech byla touto metodou

posouzena řada železničních mostů. Jedním z nich byl i most pod Vyšehradem, viz. obr. 26, kde byla zkoumána řada přípojů, jako například styčník svislice a horního pásu, viz obr. 27.



Obr. 26 Celkový pohled na most pod Vyšehradem.



Obr. 27 Styčník horního pásu a koncové svislice na mostě, jeho výkres a CBFEM model

Výsledkem CBFEM modelu je počáteční tuhost, která může být následně vložena do numerického modelu. Tento detail často svojí tuhostí významně ovlivňuje výslednou přechodnost konstrukce.

Typické detaily byly modelovány celkem na 7 dalších železničních mostech [23]. Na základě výsledků byl odvozen regresní vztah, který lze využít pro odhad tuhosti styčníku.

Pro profily do výšky menší než 550 mm lze počáteční ohybovou tuhost styčníku stanovit jako:

$$S_j = 2 \times 10^{-7} \cdot I - 2.7436 \text{ [MNm/rad]}, \quad (3)$$

Pro profily výšky od 550 mm do 900 mm lze počáteční ohybovou tuhost styčníku stanovit jako:

$$S_j = 4 \times 10^{-8} \cdot I - 31.012 \text{ [MNm/rad]}, \quad (4)$$

kde:  $S_j$  – ohybová počáteční tuhost v MNm/rad

*I* - moment setrvačnosti připojovaného prutu v mm<sup>4</sup>.

Vztahy (3) a (4) je nutno uvažovat jako prvotní odhad tuhosti a kriticky zhodnotit s ohledem na reálnou dispozici styčnicku a případně upravit (například pro jednoznačně kloubové nebo vetknuté styčnicku).

### **3.5. Využití zatěžovacích zkoušek pro validaci numerických modelů**

Přestože současné výpočetní metody jsou vysoce pokročilé a umožňují provádět náročné výpočetní analýzy, vstupy do těchto modelů a jejich vysokou přiléhavost lze získat v řadě případů pouze pomocí vhodně a účelně navržených experimentů. Není výjimkou, že provedená zkouška, jejíž finanční náročnost je v porovnání s přestavbou mostu zcela zanedbatelná, zejména v případě složitých konstrukcí, změni názor statika na chování některých detailů či styčnicků nebo i působení konstrukce. Využití experimentu k validaci výpočetního modelu jej též může zpřesnit natolik, že se původně nevyhovující konstrukce stane alespoň omezeně vyhovující.

Při plánování a provádění experimentálního ověření mostu za účelem validace výpočtového modelu se doporučuje postupovat podle ČSN 73 6209. Nicméně vzhledem k možnostem provádění měření je účelné některé požadavky redukovat či modifikovat. Takto modifikovanou zkoušku označujeme jako studijní zkoušku mostu, statickou či dynamickou. Dynamickou zkoušku pak můžeme podle ČSN 73 2044 dále rozdělit na dynamickou zkoušku zatěžovací a informativní (též tzv. experimentální modální analýzu).

Cílem statické studijní zkoušky je zejména dle [24]:

- získat podklady pro ověření statické funkce nosné konstrukce,
- ověřit přiléhavost výpočtových modelů a jeho vstupních charakteristik,
- získat charakteristiky konstrukce potřebné pro provedení přepočtu či jeho zpřesnění,
- ověření spolehlivosti konstrukce v mezích stavech použitelnosti,
- získat referenční deformační stav mostu tak, aby bylo další měření v budoucnu srovnávat s ohledem na riziko poruch a závad,
- zjistit případné závady a poruchy na základě sledování konstrukce.

Základním účelem studijní dynamické zatěžovací zkoušky je stanovit charakteristiky vynuceného kmitání zkoumaného existujícího mostního objektu. Mezi cíle patří zejména:

- získat podklady pro ověření a posouzení dynamického chování zkoumaného mostního objektu,

- ověřit výstižnost teoretického modelu použitého pro výpočet dynamického chování vyšetřovaného mostního objektu a získat podklady pro jeho upřesnění,
- prověřit, zda při provozu zkoumaného mostního objektu nedochází k nadměrnému dynamickému namáhání důležitých konstrukčních částí z hlediska mezního stavu únosnosti,
- prověřit, zda při provozu zkoumaného mostního objektu nedochází k nadměrným vibracím některých konstrukčních částí z hlediska mezního stavu použitelnosti,
- prověřit, zda nedochází k nadměrnému zrychlení mostu podle článku A2.4.4.2.1 (4) P z přílohy A2 normy ČSN EN 1990 ed.2,
- získání spekter napětí pro posouzení únavové životnosti konstrukce na základě sledování reálné dopravy.

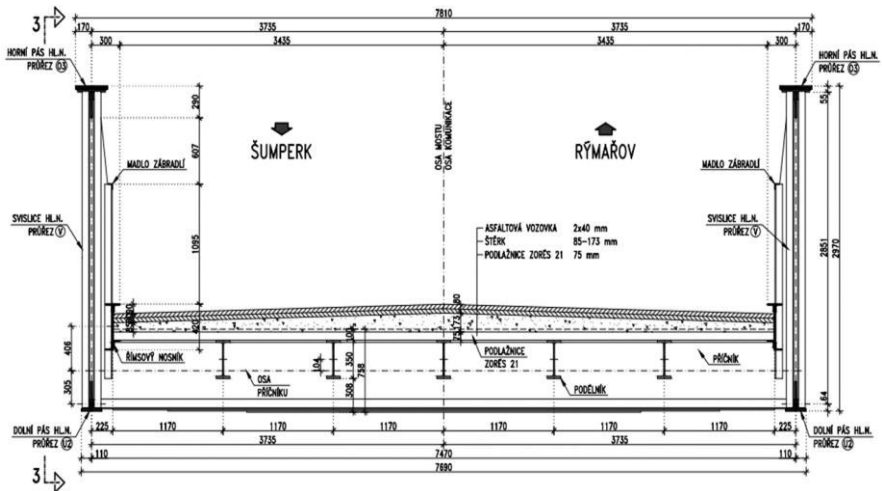
Mezi cíle dynamické informativní zkoušky (experimentální modální analýza) patří zejména:

- získat podklady pro ověření a posouzení dynamického chování zkoumaného stávajícího mostního objektu,
- ověřit potenciální riziko vzniku rezonančního kmitání celé nosné konstrukce mostu nebo některého jeho konstrukčního prvku,
- získat charakteristiky nosné konstrukce potřebné pro provedení dynamického výpočtu či jeho zpřesnění,
- ověřit výstižnost, provést verifikaci, identifikaci či validaci výpočtového modelu použitého pro výpočet dynamického nebo statického chování vyšetřovaného mostního objektu například za účelem stanovení jeho zatížitelnosti,
- získat podklady pro hodnocení skutečného stavu mostního objektu po jeho poškození a při jeho opravě,
- detekovat a lokalizovat závadu nebo poruchu zkoumaného mostního objektu,
- ověřit účinnost dílčí opravy, rekonstrukce či konstrukční úpravy mostního objektu,
- získat podklady pro kontrolu mostního objektu a pro různé případy pochybností o jeho skutečném stavu.

### **3.5.1. Experimentální práce – most v Petrově nad Desnou**

Autorem a jeho výzkumným týmem byla provedena celá řada zatěžovacích zkoušek, které následně sloužily k validaci numerického modelu. Nicméně, asi

nejzajímavější byla zkouška únosnosti mostu v Petrově nad Desnou [25]. Zkouška byla provedena na 115 let starém příhradovém nýtovaném silničním mostě, který z důvod nevyhovujícího prostorového uspořádání byl určen k demolici. Most byl postaven mostárnou bratří Kleinů v roce 1906 (Zöptauer und Stefanauer Eisenbau und Eisehütten a. g. Zöptau). Celý zkušební program, realizovaný v roce 2019, se skládal z dlouhodobého monitoringu, zesílení konstrukce pomocí metody SMA (shape memory alloys) pro zlepšení únosnosti a únavové odolnosti. Následně byl most uzavřen a byla provedena série dynamických zkoušek (modální analýza) na mostě bez poškození a mostě s provedením řízených poškození. Na závěr byla provedena zkouška s využitím 475 t zatížení. Při zkoušce byl most podrobně sledován za pomoci 96 snímačů, laserového skenování a geodetického měření. Po skončení zkoušek byl most snesen.



Obr. 28 Příčný řez mostem

Jednalo se o ocelový trémový příhradový most s dolní mostovkou. Most měl jedno pole o rozpětí 21,03 m a šířkostí 52°. Světlost mostního otvoru v šikmé byla 20,25 m. Most překonával řeku Desnou. Světla výška pod mostem byla cca 3,0 m. Na mostě byla dvoupruhová vozovka, chodníky na mostě nebyly. Světla šířka mostu byla 7,05 m. Hlavní nosnou konstrukcí mostu byly dva ocelové příhradové nosníky, které byly v osové vzdálenosti 7510 mm. Nosníky měly 8 příhrad svislicové soustavy, sudé svislice byly vynechané. Výška nosníků byla 2970 mm. Hlavní nosná konstrukce byla uložena pomocí 6 ocelových ložisek na opěry. Z toho 4 ložiska byla umístěna v osách hlavních nosníků a 2 podružná ložiska uprostřed podporových příčníků.

Mostovka se skládala z příčníků, podélníků, římsových nosníků a mostin Zorés. Vnitřní příčníky byly orientovány kolmo k podélné ose mostu v osových vzdálenostech 5050 mm a byly připojeny k hlavním nosníkům ve styčnicích dolního pásu. Vozovka se skládala z vrstvy šterku tloušťky 85 až 175 mm. V evidenci BMS byla udaná zatížitelnost  $V_n=4$  t a  $V_r=5$  t.

Investor ŘSD ČR již dlouho plánoval výměnu uvedeného mostu z důvodu velmi špatného stavu mostovky a spodní stavby. V roce 2019 bylo stavební povolení vydáno a byl i vybrán zhotovitel stavby. Toto byla i možnost využít most pro vědecké účely. Po zvážení možností, byl připraven následující experimentální program [25]:

- zřízení dlouhodobého monitoringu mostu v 96 místech (tenzometry, teplotní snímače, snímače dráhy a zrychlení),
- zesílení vybrané části mostu,
- provedení zatěžovací zkoušky před a po zesílení pro prověření jeho funkčnosti,
- provedení modální analýzy mostu pro nepoškozený stav a pro stav po provedení umělého poškození s cílem zjištění možností detekce tohoto poškození,
- lokální zatěžovací zkouška korodované mostovky z mostnic Zores,
- zatěžovací zkouška s extrémním účinkem až do porušení hlavního nosníku.

Před demolicí byl most v průběhu 3 dní postupně řízeně poškozován, a to ve třech stupních. Před poškozením, v každém stupni poškození a po opravě poškození byla provedena modální analýza mostu. Cílem těchto měření modálních charakteristik mostu bylo:

- sledování vlivu poškození na modální charakteristiky
- zjistit možnosti detekce poškození pomocí pokročilých metod založených na změně charakteristik vlastního kmitání
- vyhodnocení citlivosti jednotlivých metod na detekci poškození

Řízené poškození mostu bylo limitováno následující zatěžovací zkouškou do porušení, proto bylo volené poškození spíše menšího rozsahu.

Uspořádání měření, které bylo použito pro stanovení základních vlastních frekvencí a jim příslušných tvarů kmitání mostu, je schematicky vykresleno na obrázcích níže.

K rozkmitávání konstrukce mostu byl použit elektrodynamický budič TIRAVIB 5140. Na mostovce a hlavních nosnicích mostu byla rozmístěna síť bodů, ve kterých bylo provedeno měření odezvy mostu na buzení budičem.

Kmitání bylo celkem sledováno v 11 příčných řezech. V příčném řezu mostu bylo měřeno v 9 bodech. Kmitání mostovky bylo ve všech bodech sítě měřeno ve svislém směru a v bodech na hlavních nosnících ve směru vodorovném kolmém na podélnou osu lávky.

Snímače odezvy byly buď přímo na konstrukci nebo na ocelových závažích přichycených pomocí magnetů. Snímače byly postupně přemísťovány do jednotlivých sledovaných bodů mostovky. Základní systém experimentu byl doplněn o 2 referenční snímače (1 ve svislém směru a 1 ve směru vodorovném příčném) umístěné v těsné blízkosti budiče.



*Obr. 29 Elektrodynamický budič TIRAVIB 5140 se signálním generátorem [25]*

Měření modální analýzou a následně srovnání bylo provedeno pro stavy:

- Stav A – nepoškozený most
- Stav B – poškození PM1 – horní pas
- Stav C – poškození PM2 – diagonála
- Stav D – poškození PM3 – dolní pas
- Stav E – po opravě poškození

Na horním a dolním pásu se provedl zářez do stojiny až ke krčním úhelníkům. Oprava byla provedena za pomoci příložek a předpjatých šroubů.

K detekci a lokalizaci poškození konstrukce pomocí změny modálních charakteristik slouží několik následujících metod, které zde byly využity.

Jedním z nástrojů pro zjišťování polohy a úrovně poškození konstrukce patří změna křivosti tvarů vlastního kmitání. Pro výpočet křivosti tvarů vlastního kmitání, jejichž pořadnice jsou naměřeny či vypočteny v diskrétních bodech,

se používá metoda centrálních diferencí. Změna křivosti tvarů vlastního kmitání je označována  $CAMOSUC_{(j),x}$  (Change of mode surface curvature).

K analýze zjištěných modálních charakteristik lze také použít matici modální poddajnosti  $[\delta]$ . Z tvarů vlastního kmitání normalizovaných vzhledem k matici hmotnosti konstrukce lze přímo určit jejich příspěvek k poddajnosti konstrukce.

Pro posuzování změny dynamického chování mezi nepoškozeným XX a poškozeným YY stavem konstrukce lze použít změnu odpovídajících diagonálních členů matice  $[\delta]$ , tedy změnu průhybů konstrukce vyvolanou fiktivní jednotkovou silou působící v bodě  $r$ .

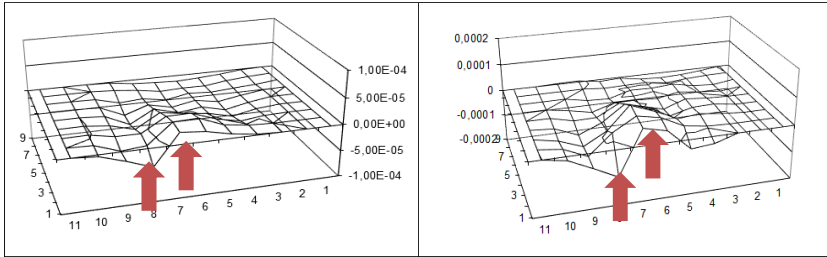
Jako další kritérium k určení polohy a úrovně poškození konstrukce použita druhá derivace změny matice modální poddajnosti  $\Delta\delta''_r$ .

Měření a vyhodnocení modálních charakteristik proběhlo celkem pětkrát: pro počáteční stav mostu - stav A, po vneseném poškození mostu PM1 - stav B, po poškození mostu PM1+PM2 - stav C, po poškození mostu PM1+PM2+PM3 - stav D a po opravě všech poškození pomocí přílozek a předpínacích šroubů - stav E. V MKP modelu mostu byly modální charakteristiky vypočteny pro stavy mostu A až D.

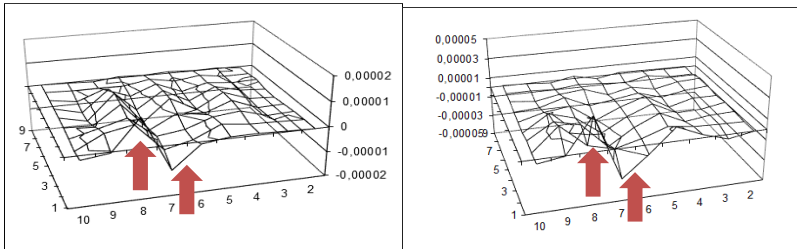
Z teoretického modelu i naměřených dat vyplývá, že tato vnesená poškození neměla na změnu vlastních frekvencí mostu v Petrově téměř žádný vliv a také změny tvarů vlastního kmitání nebyly pouhým okem rozeznatelné. Vzhledem k tomu, byly pro detekci poškození použity další tři metody: změna křivosti tvarů vlastního kmitání  $CAMOSUC_{(j),x}$  (Change of mode surface curvature), změna diagonálních členů matice modální poddajnosti a druhá derivace změny matice modální poddajnosti. Nicméně ani z grafů funkcí  $CAMOSUC_{(j),x}$  vnesená poškození nebylo možné detekovat.

Lepších výsledků detekce poškození bylo dosaženo s pomocí dalších dvou metod, změny diagonálních členů matice modální poddajnosti a druhé derivace změny matice modální poddajnosti. První poškození PM1 bylo sice i těmito metodami obtížně detekovatelné, ale následující poškození PM2 a PM3 jsou již dobře detekovatelné. Také shoda rozložení hodnot získaných těmito metodami po síti měřených bodů, jak pro změny teoretických modálních charakteristik, tak i naměřených charakteristik, byla velmi dobrá. Na základě zvýšených hodnot těmito metodami bylo možno lokalizovat místa vnesených poškození mezi řezy č. 7 a 8 na levém hlavním nosníku mostu, viz projev poškození vyznačené šipkami níže na obr. 30 a 31.



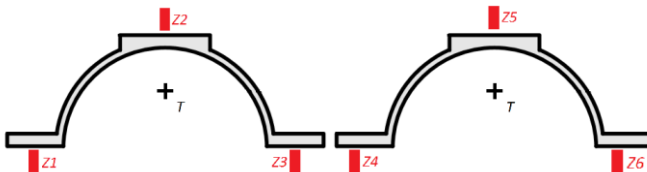


Obr. 30 Změna diagonálních členů matice modální poddajnosti  $[\delta]$  mostu – vlevo: porovnání teoretických hodnot pro nepoškozený stav mostu a stav s vneseným poškozením PM1+PM2+PM3, vpravo: porovnání naměřených hodnot pro stav mostu po opravě a stav s vneseným poškozením PM1+PM2+PM3 [25]



Obr. 31 Druhá derivace změny diag. členů matice modální poddajnosti  $[\delta]$  mostu – vlevo: porovnání teoretických hodnot pro nepoškozený stav mostu a stav s vneseným poškozením PM1+PM2+PM3, vpravo: porovnání naměřených hodnot pro stav mostu po opravě a stav s vneseným poškozením PM1+PM2+PM3 [25]

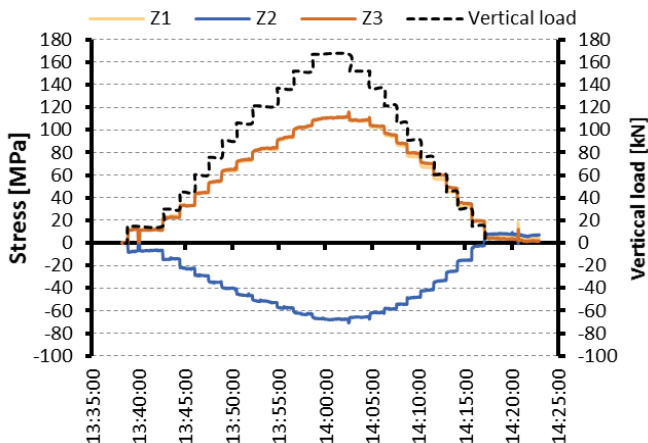
V dalším kroku byla provedena zatěžovací zkouška mostovky, a to pomocí betonových panelů o celkové hmotnosti 17 t a velikosti  $1,0 \times 3,0 \times 0,215$  m. Ty byly uloženy na dřevěné podkladky velikosti  $0,5 \times 0,5$  m, které simulovaly zatížení kolem. Tenzometry byly osazeny na horní a dolní vlákna průřezu mostin Zores, jak je vidět na obr. 32.



Obr. 32 Poloha tenzometrů na mostinách Zores

Celkový dosažený průhyb mostin byl jen 1,4 mm (relativní průhyb mezi podélníky) a maximální dosažené napětí 130 MPa. Tyto výsledky ukázaly

velký vliv spolupůsobení s vozovkou. Porovnáme-li výsledky s modelem bez vozovky, je patrné, že vliv tuhosti a únosnosti vozovky na redukci napětí a průhybu je cca 35%, což lze označit za významné.



Obr. 33 Napětí v mostinách Zores v horních a dolních vláknech [25]

Pro dosažení předpokládané meze kluzu by bylo nutno dosáhnout zatížení 33 t, což odpovídá nápravovému zatížení 66 t, což ukazuje na mimořádnou odolnost i poměrně značně zkorodované mostovky staré 115 let, na které nebyla provedena jakákoliv stavební údržba. Po demolici mostu byl posouzen i stav mostin Zores. Mostiny vykazovaly korozní poškození, které se pohybovalo v rozmezí 10-20 %.

Globální zkouška mostu byla svým rozsahem výjimečná. Jejím hlavním cílem bylo:

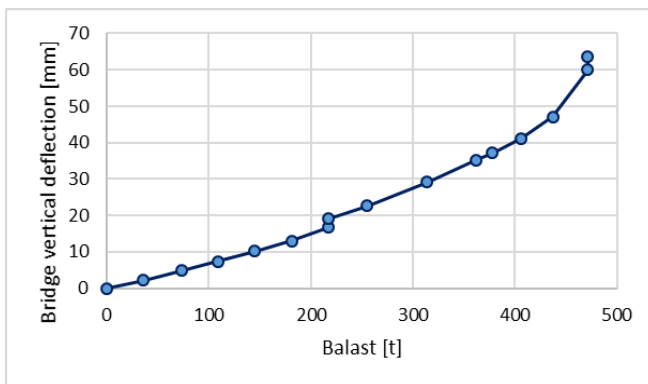
- analyzovat chování mostu v nelineární zatěžovací fázi, po překročení meze kluzu,
- zjištění skutečné únosnosti mostu,
- zjistit nelinearity pro validaci numerického modelování.

Zatížení bylo prováděno pomocí betonových panelů velikosti  $3,0 \times 1,0 \times 0,215$  m. Ty byly umístěny do šesti vrstev o celkové výšce 1,29 m. Následně bylo na panely osazeno 158 pytlů naplněných šterkem o velikosti  $1,05 \times 1,05 \times 1$  m, postupně skládaných do stabilní pyramidy. Celkové zatížení pak 475 t. Poloha zatížení je vidět na obr. 34.



Obr. 34 Půdorys mostu s polohou maximálního zatížení

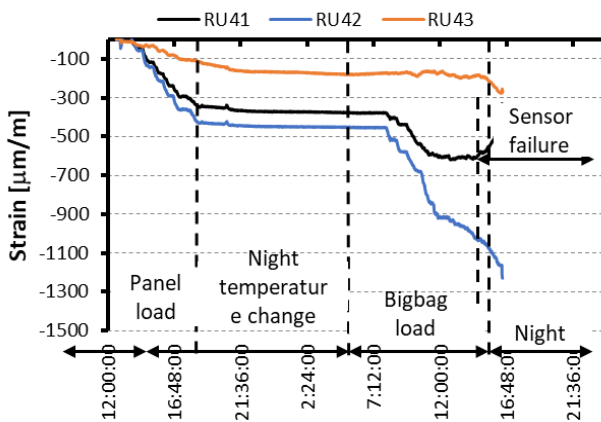
Zatěžování probíhalo ve dvou dnech. V prvním dni byl most zatížen až na bezpečnou pružnou mez. Následně ráno bylo zahájeno zatěžování až do maxima s použitím big-bagů. V této fázi bylo patrné progresivně nelineární chování, jak je vidět na obr. 35.



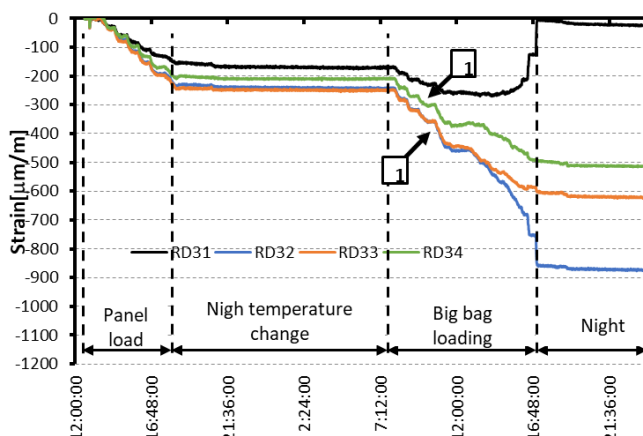
Obr. 35 Vztah mezi průhybem mostu a zatížením

I když celkového kolapsu mostu nebylo dosaženo, řada prvků byla nevratně poškozena, jak je patrné z reziduální trvalé deformace. Je to patrné na diagonále RD3, která dosáhla plastifikace, následně docházelo k rapidnímu nárůstu přetvoření směrem ke kritickému zatížení. Podobné chování je patrné i na horním pásu.

Trvalá deformace se projevila i na průhybu. Na levém nosníku byla trvalá deformace 10 mm, na pravém pak 25 mm (což odpovídá 40 % celkové svislé deformace).

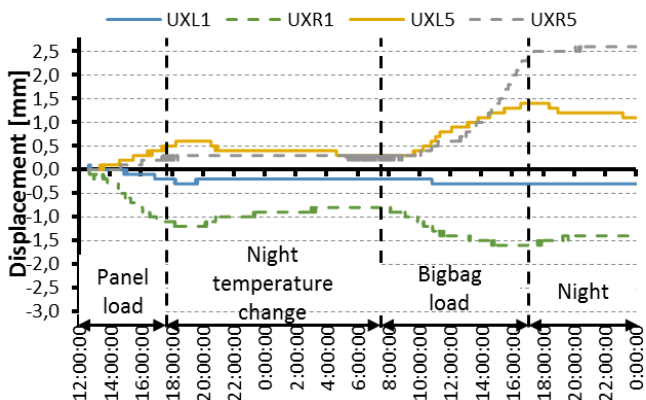


Obr. 36 Napětí v horním pásu, pásnici a stojně



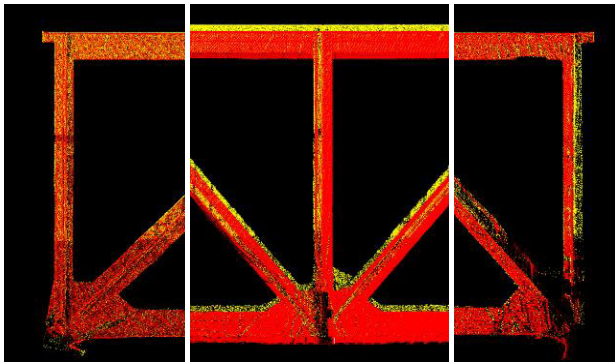
Obr. 37 Napětí ve střední diagonále

Zajímavé chování bylo zaznamenáno na ložiskách. Vodorovná tuhost byla značná zejména v případě pohyblivých ložisek ( $U_{XL5}$  a  $U_{XR5}$ , viz obr. 38). Jejich posun byl menší než posun pevných ložisek (pro představu, při volných ložiskách by vodorovný posun byl 14 mm, dosažený posun byl jen 1,5 mm). To je známkou jednak koroze v ložiskách, ale zejména vlivu omezení deformace nosné konstrukce na konci. Důvod byl nalezen po demolici mostu.



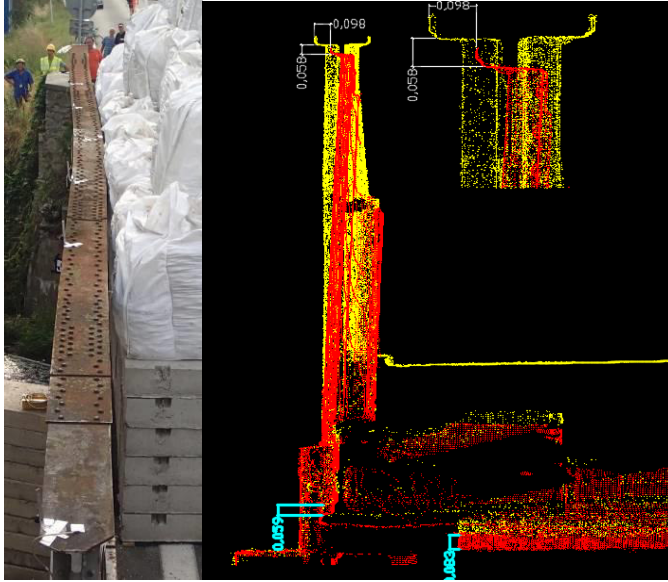
Obr. 38 Vodorovný posun v ložiskách,  $u_{x15}$  a  $u_{x5}$  jsou ložiska posuvná

Koncový příčnick byl zafixován do závěrné zídky v důsledku dřívější opravy, což významně omezilo dilatační kapacitu mostu. Zablokování konců nosné konstrukce je patrné i z laserového skenování. Po srovnání původní (žluté) a výsledné (červené) polohy je patrné, že posun ložisek byl zcela minimální, viz obr. 39.



Obr. 39 Laserový sken hlavního nosníku, ukazující minimální posuny v ložiskách a průhyb hlavního nosníku

Vysvětlením trvalé hodnoty průhybu je, že v nýtovaných styčnicích nedošlo pouze prokluzu v pootočení, ale i prokluzu v podélném směru prvků. Tento prokluz a související lokální plastifikace byla cca 1 mm u dolního pásu a u diagonál v tlaku.



*Obr. 40 Vlevo pohled na příčnou deformaci pásnice, vpravo srovnání skenů před zkouškou a s maximálním zatížením*

Na základě vyhodnocení měření a numerického nelineárního modelu byla stanovena kritická mezní reálná únosnost na hodnotu  $F_{cr} = 5070$  kN.



*Obr. 41 Pohled na most se zatížením 475 t*

Provedení této zatěžovací zkoušky bylo unikátní možností pochopit skutečné působení ocelového nýtovaného mostu. Při zkoušce bylo zjištěno mnoho významných a důležitých informací. Hlavní závěry lze rekapitulovat jako:

- nápravovou únosnost mostovky s mostinami Zores lze stanovit na hodnotu 66 t,
- odběrem vzorků byla zjištěna v kritickém místě mostní konstrukce cca o 25 % vyšší hodnota meze kluzu, než bylo předpokládáno,
- globální zkouška ukázala chování mostu v pružnoplastické a nelineární oblasti, přičemž trvalá deformace se dá vysvětlit pouze prokluzem v nýtovaných styčnicích,
- omezení posunu koncového příčnicku zabetonováním do závěrné zídky významně ovlivnilo chování mostu. Posuvná ložiska se prakticky neposouvala ani při takto extrémním zatížení.

### 3.5.2. Analýza chování puklovek – most Hybešova

Při přepočtech historických mostů narážíme někdy na konstrukční prvky, které jsou dnes již téměř nepoužívané a nepřiliš známé. Jedním takovým prvkem je tzv. „puklovka“, historický předchůdce ocelové ortotropní mostovky. Puklovka je vydutý mostovkový plech plnící svou funkci na základě membránové napjatosti. Její plech má obdélníkový, někdy lichoběžníkový tvar a vydutím připomíná tvar obrácené klášterní klenby. Rozměry puklovky jsou od 1 do 4 m<sup>2</sup>, se stranami v poměru 1:1,5 a tloušťkou plechu od 8 do 10 mm. Okraje tvoří rovná příruba o šířce 50 mm. Puklovky jsou na konstrukci umístěny do rámu mezi příčnicku a podélníky. Plech obruby je po celém svém obvodu připevněn k horním pásnicím mostovkových prvků pomocí nýtů o průměru 20 mm. V nejhlubším místě každé puklovky je otvor pro odvodnění.

V rámci rekonstrukce mostů Hybešova a Křídlovická v Brně mělo při stavbě dojít k rozsáhlé výměně těchto prvků za nové z oceli S355, nicméně ale s výrazným omezením doby výluk. Současně s ohledem na obtížný přístup nebyl jasný stav a korozní oslabení puklovek. Zhotovitel (FIRESTA a.s.) v rámci přípravy stavby potřeboval znát odpověď na následující otázky.

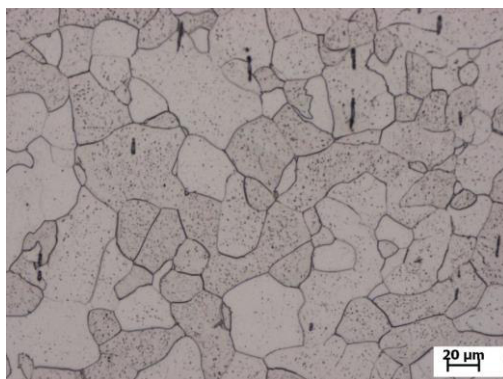
- Je možné stávající puklovky s ohledem na dodržení výluk ponechat a za jakých podmínek?
- Vyhoví stávající puklovky staticky při uvážení skutečných materiálových vlastností a reálného působení? Jaké jsou parametry původní oceli i s ohledem na svařitelnost?
- Jaká je minimální tloušťka po korozním oslabení, aby bylo možné puklovku ponechat?

Problémem již zmíněné rekonstrukce byla otázka, jak tento historický prvek nahradit. S ohledem na časová omezení ve výluce, pracnost výměny a i historickou hodnotu proběhla řada diskusí o možnosti ponechání puklovek a stanovení podmínek, za kterých vyhovují současným statickým požadavkům.



*Obr. 42 Odebraný plech puklovky*

S tímto cílem byl sestaven komplexní diagnostický, výpočetní a experimentální program, jehož cílem bylo uvedené otázky zodpovědět [27].



*Obr. 43 Mikrostruktura materiálu, zvětšení 200x*

Původní výrobní technologie, kování za tepla, je dnes obtížně realizovatelná. Možností je pouze zhotovení lisováním za studena u firmy Maurer, nicméně i to je spojeno se značnými obtížemi (nutnost přesné výroby puklovek na míru, tak aby odpovídaly dnes zakrytému stavu, což vede zejména k významným časovým nárokům neslučitelným s dobou výluky).

Na počátku projektu bylo provedeno měření zbytkové tloušťky prvků puklovek ultrazvukem, a to s příznivými výsledky. Nejmenší naměřenou tloušťkou bylo 6,5 mm, běžně naměřenou hodnotou tloušťky plechu bylo 8 mm. Naprostá většina plechů puklovek byla korozi zasažena minimálně. Důvodem byla kvalitně provedená asfaltová izolace



Dále byly provedeny zkoušky tahem, chemického složení a metalografický rozbor, které prováděla Fakulta strojní ČVUT v Praze. Výsledky těchto zkoušek ukázaly na vysoce kvalitní ocel. Vyhodnocena byla hodnota rozhodující návrhové min. meze kluzu  $f_{yd}=293,9$  MPa. Materiál puklovek je jiný a má lepší vlastnosti, než jsou obvyklé pro plávkovou a svařkovou ocel. Mez kluzu materiálu není výrazná a je obecně blíže mezi pevnosti. Důvodem těchto vlastností je s největší pravděpodobností výrobní proces, kování a tváření plechu za tepla. To bylo potvrzeno i metalografickou analýzou, viz obr. 43. Ta ukazuje na feritickou ocel se sulfidickými ostrůvky typicky protaženými vlivem plastické deformace.



*Obr. 44 Zkušební sestava pro experimentální analýzu, zasypávání puklovky s osazenými tenzometry*

Po materiálových zkouškách byla provedena statická a dynamická zatěžovací zkouška jedné historické puklovky. Hlavním cílem zkoušky bylo nasimulovat reálné působení, na jejím základě pak validovat výpočetní model a dosáhnout tak optimálního využití oproti běžným předpokladům.

Pro zatěžovací zkoušku byla vytvořena zkušební sestava, viz. obr. 46, jejíž základ tvoří ocelový rám uložený na čtyřech sloupcích, rám i sloupky jsou z profilů IPE300. Do rámu byla uložena historická puklovka, která byla přinýtována k horním pásnicím I-profilů. Rám s osazeným plechem puklovky byl vyplněn šterkem a zhutněn. Na vrstvu šterku byl uložen pravec, přes který bylo vnášeno zatížení. Zatěžování bylo provedeno ve dvou zatěžovacích stavech, lišících se polohou pravece v polovině a ve čtvrtině plechu puklovky.

Při zatěžovací zkoušce bylo pomocí 32 tenzometrů LY11-10/120 měřeno poměrné přetvoření, 17 induktivními snímači dráhy byly měřeny posuny. Měřena byla napětí při obou površích podél příčné i podélné osy puklovky, v rozích plechu a na obrubě.

Zatížení zkušební sestavy bylo zajištěno hydraulickým válcem. Hodnota vnášeného zatížení představující kolovou sílu byla určena dle zatěžovacího modelu LM71 podle ČSN EN 1991-2 s dynamickým součinitelem  $\delta=2,00$ .

Z průběhu statické zatěžovací zkoušky byly vyhodnoceny průběhy a extrémní výkmity napětí a deformací plechu puklovky, využití plechu ani při působení návrhového zatížení nepřesáhlo 75 %.

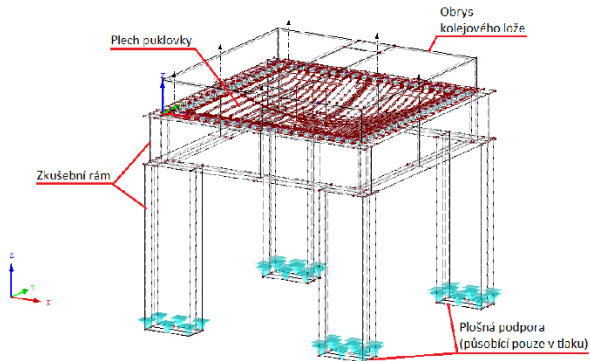
Pro zjištění chování historické puklovky bylo, kromě výše zmíněných laboratorních měření, využito numerické analýzy. Podrobný numerický model puklovky i se zkušebním rámem byl vytvořen ve výpočetním programu RFEM, přičemž model byl validován podle výsledků experimentu. Zjišťována byla odezva na zatížení při uvažování různých zatěžovacích stavů. Následně byly výsledky porovnány s výsledky naměřenými při laboratorních zkouškách. Numerický model byl průběžně validován tak, aby co nejlépe vystihoval skutečné chování plechu puklovky.

Pro numerickou analýzu byl vytvořen prostorový model skládající se z deskostěnových a solid prvků včetně kontaktů, viz. obr. 45.

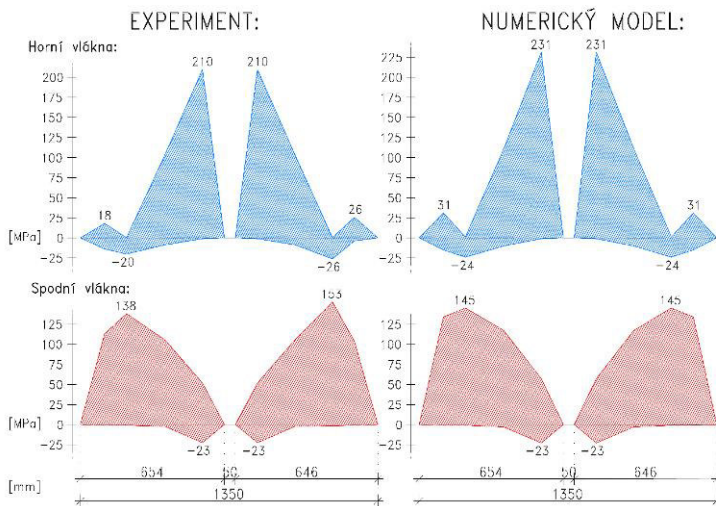
Tvar a rozměry plechu puklovky byly zjištěny laserovým skenováním. Plech byl modelován jako plocha z 2D prvků tloušťky 8 mm. Rám podpírající puklovku byl modelován pomocí desko-stěnových prvků. Nýty spojující zkušební rám a puklovku byly modelovány jako 1D prvky. Tyto prvky působí pouze v tahu a je jim umožněn prokluz 1 mm do každé strany ve směru kolmo na osu prvku. Tím byla simulována vůle nýtů v otvoru. Modul pružnosti plechu puklovky a nýtů byl uvažován stejnou hodnotou  $E=195$  GPa, vycházející z materiálových zkoušek. Zatížení pražcem bylo uvažováno s ohledem na jeho tuhost jako spojitě. V patě každé stojky zkušebního rámu byla umístěna plošná podpora působící pouze v tlaku.

Uvažované proměnné zatížení vycházelo z experimentální analýzy. Zatěžováno bylo charakteristickými a návrhovými hodnotami kolové síly v obou zatěžovacích stavech, tj. pro polohu pražce v polovině a ve čtvrtině plechu. Pro výpočet byla použita nelineární analýza.

Výsledné hodnoty napětí byly porovnány ve všech tenzometricky měřených místech. Na obr. 46 jsou vykresleny hodnoty napětí na podélné a příčné ose puklovky, získané numerickou analýzou a laboratorním měřením při zatěžování pro MSÚ. Lze pozorovat velmi dobrou shodu vyšších hodnot napětí, a to do 125%. Hodnoty napětí získané z numerické analýzy jsou v porovnání s experimentem vyšší, což znamená, že tento přístup je na bezpečné straně.



Obr. 45 Drátěný a rendrovaný numerický model zkušební sestavy s puklčkou [27]



Obr. 46 Průběh napětí na příčné ose puklčky [27]

Následně bylo přistoupeno k hodnocení chování puklčky s uvážením korozního oslabení. Pomocí numerické analýzy byla zkoumána hodnota maximálního přípustného korozního oslabení z hlediska posouzení zatížitelnosti. Korozní oslabení bylo simulováno změnou tloušťky plechu (pro různé polohy koroze) a bylo pozorováno, zda účinky kolových sil nepřesáhnou hodnotu maximálních dovolených lokálních účinků od modelu LM71. Účinky zatížení byly sledovány při korozním oslabení plechu v rozsahu 0 až 1,5 mm. Pro tato korozní oslabení nebyla překročena maximální dovolená hodnota

napětí. Minimální přípustná tloušťka plechu puklovky, se kterou lze tento prvek zachovat v provozu, byla stanovena hodnotou  $t_{\min} = 6,35$  mm.

Provedená analýza prokázala, že konstrukce historických puklovek je možno v mnohých případech zachovat i při splnění současných normativních požadavků. Tím lze vzácně skloubit věci obvykle neslučitelné - minimalizovat dobu výluky, snížit pracnost rekonstrukce a navíc zajistit její ekonomicky efektivní řešení zachovávající historickou a památkovou hodnotu mostu.

## **4. Závěr**

V uvedených kapitolách byl ukázán význam, ale i složitost procesu hodnocení historických ocelových konstrukcí. Zjištěné poznatky mohou významně pomoci zachránit řadu mostních konstrukcí i pro naše budoucí pokolení a nadále chránit industriální kulturní bohatství této země.

## 5. Literatura

- [1] ČSN ISO 2394/2003 – Obecné zásady spolehlivosti konstrukcí
- [2] ČSN EN ISO 13822 /2014 – Zásady navrhování konstrukcí – Hodnocení existujících konstrukcí
- [3] ČSN 73 0038 /2014 - Hodnocení a ověřování existujících konstrukcí – Doplňující ustanovení
- [4] Metodický pokyn pro určování zatížitelnosti železničních mostních objektů. 2015
- [5] Ryjáček, P., Rotter, T., Sýkora, M., Mlčoch, J., Pospíšil, M., Kudláček, J., Metody pro zajištění udržitelnosti ocelových mostních konstrukcí industriálního kulturního dědictví, Metodika pro diagnostiku ocelových mostních konstrukcí kulturního dědictví. 2019
- [6] Stančík, V., Ryjáček, P., Stav ocelových mostů po sto letech užívání. Konstrukce. 2019, 18(2), p. 79-82. ISSN 1803-8433.
- [7] Ryjáček, P., Vopatová, K., Litoš, J., Vlasák, M., Žemlička, J.: Statická a dynamická studijní zatěžovací zkouška mostu. Dlouhodobý monitoring mostu v km 3,706 na traťovém úseku výh. Praha Vyšehrad-Vyšehrad v.601, 602, 603
- [8] IRS 77802: Recommendations for determining the carrying capacity and fatigue risks of existing metallic railway bridges; Eurocode Background Documents; JRC Scientific and Technical Reports. 2019.
- [9] B. Kühn, M. Lukić, A. Nussbaumer, H.-P. Günther, R. Helmerich, S. Herion, M.H. Kolstein, S. Walbridge, B. Androic, O. Dijkstra, Ö. Bucak. Assessment of Existing Steel Structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life, ECCS 2008
- [10] Guideline for Load and Resistance Assessment of Existing European Railway Bridges . Advices on the use of advanced methods. Sustainable Bridges SB-LRA. COWI A/S 2007.
- [11] CEN/TS 17440:2020 Assessment and retrofitting of existing structures.
- [12] Landolfo, R., Cascini, L., Portioli, F. Modeling of metal structure corrosion damage: a state of the art report. Sustainability, 2010, 2.7: 2163-2175.
- [13] Macho, M., Ryjáček, P., Matos, J. Static and Fatigue Test on Real Steel Bridge Components Deteriorated by Corrosion. International Journal of Steel Structures. 2019, 2019(1), p. 110-130. ISSN 1598-2351.
- [14] ČSN EN 1991-1-4 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-4: Obecná zatížení - Zatížení větrem, ČNI 2007

- [15] Žitný, J., Ryjáček, P. Reserves in load capacity assessment of existing bridges. In: Bílý, P., Kohoutková, A., eds. Building up Efficient and Sustainable Transport Infrastructure 2017 (BESTInfra2017). Praha, 2017-09-20/2017-09-22. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2017. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, sv. 236. ISSN 1757-899X. DOI 10.1088/1757-899X/236/1/012061.p. 485-492
- [16] XU, S., Qiu, B.. Experimental study on fatigue behavior of corroded steel. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2013, 584: 163-169.
- [17] Xu, S., You-de Wang. Estimating the effects of corrosion pits on the fatigue life of steel plate based on the 3D profile. *International Journal of Fatigue* [online]. 2015, 72: 27-41.
- [18] Rahgozar, R., Sharffi, Y. Remaining Fatigue Life of Corroded Steel Structural Members. *Advances in Structural Engineering* [online]. 2011, 14(5): 881-890.
- [19] Garbatov, Y., Guedes Soares, C., Parunov, J. Fatigue strength experiments of corroded small scale steel specimens. *International Journal of Fatigue* [online]. 2014, 59: 137-144.
- [20] Zhang X.-Y., LI S.-X., Liang R., Akid, R. Effect of corrosion pits on fatigue life and crack initiation. 13th International Conference on Fracture. Peking, Čína. 2013.
- [21] Pipinato, A., Pellegrino, C., Bursi, O.S., Modena, C.. High-cycle fatigue behavior of riveted connections for railway metal bridges. *Journal of Constructional Steel Research* [online]. 2009, 65(12): 2167-2175.
- [22] Heinemeyer, Ch., Feldman, M. The influence of rivet corrosion on the durability of riveted connections. *Steel Construction* [online]. 2011, 4(3): 188-192.
- [23] Minor García, O. a Ryjáček, P. Rotational Stiffness of Connections in a Historical Steel Railway Bridge. In: *Structural Analysis of Historical Constructions. 11th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*, Cusco, 2018-09-11/2018-09-13. Springer, Cham, 2019. s. 1082-1089. ISSN 2211-0844.
- [24] SŽ S5/1 Diagnostika, zatížitelnost a přechodnost železničních mostních objektů, SŽ s.o., 2021
- [25] Ryjáček, P., Stančík, V., Macho, M., Vůjtěch, J., Ghafoori, E., Lefebvre, S., Prajzlerová, I., Matos, J., Polák, M., Plachý, T., Litoš, J., Jašek, P. Ověření nové technologie SMA pro zesílení mostu - most 11-097 přes řeku Desná v obci Petrov nad Desnou, Závěrečná zpráva. 2019

- [26] Ryjáček, P., Stančík, V., Braun, J., Jašek, P. The ultimate load test of the historical riveted road bridge. IABSE Symposium, Wroclaw, May 20-22, 2020, p. 1132-1140
- [27] Ryjáček, P.; Vůjtěch, J.; Macho, M.; Stančík, V. Historické konstrukce puklovek: experimentální a numerická analýza. In: Inženýrské problémy obnovy památek. Praha 2: Informační centrum ČKAIT s.r.o., 2019. p. 94-100.

## **Autor a CV**

**doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.**

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, Fakulta stavební, ČVUT v Praze  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

e-mail: pavel.ryjacek@fsv.cvut.cz

datum a místo narození: 20. února 1977, Plzeň

### **Vzdělání:**

2000-2003 Fakulta stavební, ČVUT v Praze, Katedra ocelových konstrukcí, doktorské studium. Téma „Půdorysně zakřivené ocelobetonové spřažené mosty” Udělen titul “Ph.D.”

3.1.-31.5.2002 Studijní stáž na City university, London, United Kingdom

1995-2000 Fakulta stavební, ČVUT v Praze. Magisterské studium, obor „Konstrukce a dopravní stavby“ Diplomová práce: “Ocelový most přes Vltavu v Praze – Suchdole. Udělen titul “Ing.”

### **Zaměstnání:**

2014 až současnost Docent na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, Praha 6

1.9.2012 až 2014 Odborný asistent na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, Praha 6

1.9.2008 až současnost Vedoucí projektant – skupina ocelových konstrukcí a mostů.

28.11.2006 Udělena autorizace v oboru mosty a inženýrské konstrukce.

1.7.2003-30.8.2008 VPÚ DECO PRAHA a.s. Projektant ocelových konstrukcí a mostů.

1998-2003 Pontex s.r.o., zaměstnán na částečný úvazek  
Projektant ocelových konstrukcí - statické výpočty ocelových a ocelobetonových konstrukcí a mostů, tvorba výkresové dokumentace ve stupních DÚR až RDS.

### **Pedagogická činnost:**

Přednášky:

- OCM1 - Ocelové mosty 1
- YOM2 - Ocelové mosty 2
- OCM2 - Ocelové mosty 2



- YZNM - Základy navrhování mostů
- STB - Steel bridges

Dále vedení diplomových a bakalářských prací, vedení projektů, cvičení.

Člen pedagogické rady bakalářského a magisterského studijního oboru Konstrukce a dopravní stavby

**Nejvýznamnější řešené projekty** (řešitel nebo spoluřešitel):

- TE01020168 Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI)
- CE803030106 Vliv únavy na únosnost zesílené konstrukce těžké mostové soupravy
- CE803120112 Využití modální analýzy pro hodnocení mostních konstrukcí
- TA04030714 - Progresivní mostní závěr s nízkou hlučností a inteligentními prvky
- Řešitel Úkolu technického rozvoje „Aplikace plastových FRP materiálů na železničních mostech a tunelech“
- Řešitel Úkolu technického rozvoje „Funkčnost a spolehlivost mostů s řídicí tyčí MW“
- COST LD15127 Pokročilé metody posuzování degradovaných ocelových konstrukcí
- COST LD15131 Chování ocelových konstrukcí zesílených FRP při náročných účincích prostředí
- NAKI II DG18P02OVV033 Metody pro zajištění udržitelnosti ocelových mostních konstrukcí industriálního kulturního dědictví
- SBRIplus - Valorisation of Knowledge for Sustainable Steel-Composite Bridges in Built Environment, Research Fund for Coal and Steel, RFCS, 2016-2019
- TA04030714 Progresivní mostní závěr s nízkou hlučností a inteligentními prvky
- Koncepty Fakulty Stavební ČVUT pro Prahu 2017, CZ.07.1.02/0.0/0.0/16\_040/0000377, řešitel DK4 a DK5
- OPERAČNÍ PROGRAM PODNIKÁNÍ A INOVACE PRO KONKURENCESCHOPNOST, Pozemní radarová interferometrie pro zajištění kritické energetické infrastruktury ČR, 2020-2023
- CK02000304, Kriteriaální metoda hodnocení hlučností mostních závěrů po zabudování. 2021-2024, DOPRAVA 2020+

- Pokročilá technologie rychlého určování deformací mostů radarovou interferometrií a její využití v diagnostice. UTIA, AV ČR, v.v.i., FSv ČVUT v Praze, VI3VS/758
- FW01010384 - Vývoj optovláknových měřidel pro podzemní stavby a opěrné konstrukce (2020-2023, TA0/FW)
- TK01030116 - Návrh konceptu bezpečnostně důležitých prvků rychlého heliem chlazeného demonstračního reaktoru ALLEGRO (2018-2025)

#### **Členství v organizacích a komisích:**

- Člen Bridge committee ECCS (European Convention for Constructional Steelwork)
- Autorizovaný inženýr v oboru Mosty a inženýrské konstrukce, ČKAIT
- Oprávnění pro provádění hlavních prohlídek mostů pozemních komunikací
- Oprávnění k provádění průzkumných a diagnostických prací souvisejících s výstavbou, opravami a údržbou pozemních komunikací, obor Diagnostický průzkum silničních objektů a Zatěžovací zkoušky mostů
- Člen komise pro mosty na Ministerstvu dopravy ČR
- Člen pracovní skupiny pro mosty na ŘSD ČR
- Odborný garant mezinárodních symposií Mosty konaných každoročně v Brně

#### **Ocenění**

- ECCS 2012 - European Award for Steel Bridges: Certificate of Merit - Locket Bridge on R6 road in Nové Sedlo (Czech Republic)
- Česká dopravní stavba 2010, cena předsedy ČSS. Sklopný silniční most České Vrbné
- Cena ČKAIT 2010. Rekonstrukce mostu přes Ohři na stavbě silnice R6 – Nové Sedlo Sokolov
- Česká dopravní stavba 2010, cena za stavební detail: Rekonstrukce železničního mostu Kolín
- Cenu za dopravní infrastrukturu v soutěži Stavba roku Středočeského kraje 2012. Rekonstrukce železničního mostu Kolín
- Stavba roku 2021, Cena státního fondu dopravní infrastruktury. Silniční most přes Labe mezi Valy a Mělicemi

## Vybrané publikace:

- Macho, M., P. Ryjáček a J. Matos. Fatigue Life Analysis of Steel Riveted Rail Bridges Affected by Corrosion. *Structural Engineering International*. 2019, 29(4), p. 551-562. ISSN 1683-0350. DOI 10.1080/10168664.2019.1612315.
- Kašpárek, J., Ryjáček, P., Rotter, T., Polák, M., Calçada, R.: Long-term monitoring of the track-bridge interaction on an extremely skew steel arch bridge. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10 (3), p. 377-387. 2020.
- Macho, M., P. Ryjáček a J. Matos. Static and Fatigue Test on Real Steel Bridge Components Deteriorated by Corrosion. *International Journal of Steel Structures*. 2019, 2019(1), p. 110-130. ISSN 1598-2351. DOI 10.1007/s13296-018-0099-6.
- Ryjáček, P. a M. Vokáč. Long-term monitoring of steel railway bridge interaction with continuous welded rail. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014, 99(99), 176-186. ISSN 0143-974X. DOI 10.1016/j.jcsr.2014.04.009.
- Ryjáček, P. et al. Holistic approach to sustainability of bridges. *Steel Construction*. 2018, 11(3), p. 179-183. ISSN 1867-0520. DOI 10.1002/stco.201800008.
- Stančík, V., P. Ryjáček a M. Vokáč. Thermal and load rate-dependent interaction between embedded rail system and bridge. *Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019, 233(3), p. 326-336. ISSN 2041-3017. DOI 10.1177/0954409718795092.
- Cábová, K. et al. Fire test of FRP members applied for the renovation of a steel railway bridge. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*. 2018, 17(1), p. 23-38. ISSN 1643-1618. DOI 10.7409/rabdim.018.002.
- Bily, P.; Fladr, J.; Ryjáček, P., Stančík, V, Unprotected polymer fiber reinforced concrete deck as a wearing surface of a bridge: Pilot application. *Bridge structures*, 16/1, 2020, p. 15-26.
- Ryjáček, P. The diagnostic techniques for the assessment of the historical steel bridges. In: *IABSE Symposium, Guimaraes 2019: Towards a Resilient Built Environment Risk and Asset Management - Report*. Istanbul: IABSE, 2019. p. 1651-1657. "
- Ryjáček, P.; Petřík, M.; Adamovic, N. Arch Bridge Quality Control Plans. In: *Advanced Technologies, Systems, and Applications IV - Proceedings of the International Symposium on Innovative and Interdisciplinary Applications of Advanced Technologies (IAT 2019)*. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 187-204.

- Žák, J., J. Suda a P. Ryjáček. Polymer Modification Technologies and Asphalt Mixtures Fatigue Resistance in Pavement Structures. In: SINGH, D. et al., eds. Geo-China 2016: Innovative and Sustainable Solutions in Asphalt Pavements. Fourth Geo-China International Conference, Jinan, Shandong, 2016-07-25/2016-07-27. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2016. p. 11-18. ISSN 0895-0563.
- Kedar, A., Sein, S., Ademovic, N., Panetsos, P., Ryjáček, P., Duke, A., Matos, J.C.: Developing case studies for implementing COST TU1406 quality control plan procedure for typical highway bridges. IABSE Symposium, Guimaraes 2019: Towards a Resilient Built Environment Risk and Asset Management - Report, p. 531-539. 2019.
- Cábová, K. et al. Fire Test of FRP Members Applied to Railway Bridge. In: MOREYRA GARLOCK, M.E. a V.K.R. KODUR, eds. Proceedings of Ninth International Conference Structures in Fire. Structures in Fire, Princeton, 2016-06-08/2016-06-10. Princeton: Princeton University Press, 2016. p. 784-790. ISBN 978-1-60595-320-5.
- Ryjáček, P. et al. Deterioration and assessment of steel bridges. In: Maintenance, Monitoring, Safety, Risk and Resilience of Bridges and Bridge Networks - Proceedings of the 8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2016. IABMAS 2016: The Eighth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Foz do Iguaçu, 2016-06-26/2016-06-30. Leiden: CRC Press/Balkema, 2016. p. 1188-1195. ISBN 9781138028517.
- Žitný, J., P. Ryjáček a M. Lepš. The complex approach to optimization of composite bridges. In: Life-Cycle of Engineering Systems: Emphasis on Sustainable Civil Infrastructure. The Fifth International Symposium on Life-Cycle Engineering IALCCE 2016, Delft, 2016-10-16/2016-10-20. Londýn: Taylor & Francis Group, 2017. p. 1881-1890. ISBN 978-1-138-02847-0.
- Bílý, P. et al. Development of special fibre reinforced concrete for exposed concrete pavements on bridges. In: Dvorský, T., A. Kohoutková a V. Vytlačilová, eds. Fibre Concrete 2015 - Technology, Design, Application. Fibre Concrete 2015, Praha, 2015-09-10/2015-09-11. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2015. ISSN 2336-338X. ISBN 978-80-01-05683-7. p.1-8
- Macho, M., P. Ryjáček a J. Matos. Fatigue and corrosion as a threat for steel heritage bridges. In: IABSE SYMPOSIUM NANTES, 2018.

- 40th IABSE Symposium, 19-21 September 2018, Nantes, France, Nantes, 2018-09-19/2018-09-21. Zürich: IABSE c/o ETH Höggerberg, 2018. p. 2364-2370. ISBN 978-3-85748-161-1.
- Žitný, J. a P. Ryjáček. Reserves in load capacity assessment of existing bridges. In: Bílý, P. a A. Kohoutková, eds. Building up Efficient and Sustainable Transport Infrastructure 2017 (BESTInfra2017). Praha, 2017-09-20/2017-09-22. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2017. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. sv. 236. ISSN 1757-899X. DOI 10.1088/1757-899X/236/1/012061.p. 485-492
  - Žitný, J. et al. Hidden safety in equilibrium verification of a steel bridge based on wind tunnel testing. In: Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering. Towards an Integrated Vision. 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Ghent, 2018-10-28/2018-10-31. Leiden: Taylor & Francis/Balkema, 2019. p. 307-313.
  - Minor García, O. a P. Ryjáček. Rotational Stiffness of Connections in a Historical Steel Railway Bridge. In: Structural Analysis of Historical Constructions. 11th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Cusco, 2018-09-11/2018-09-13. Springer, Cham, 2019. s. 1082-1089. ISSN 2211-0844.
  - Tichý, J. et al. UHPC railing panels for a bridge renovation in sázava municipality. In: Solid State Phenomena. 24th Concrete Days, Litomyšl, 2017-11-22/2017-11-23. Uetikon-Zurich: Trans Tech Publications, 2018. p. 299-304. sv. 272.
  - Ryjáček, P., Stančík, V., Braun, J., Jašek, P. The ultimate load test of the historical riveted road bridge. IABSE Symposium, Wroclaw, May 20-22, 2020, p. 1132-1140
  - Ryjáček, P. Assessment of historical steel bridges. In: Advances in Engineering Materials Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications. London: Taylor & Francis, 2019. p. 2176-2180. ISBN 978-1-138-38696-9.
  - Lenner, L., Ryjacek, P., Sykora, M. Resistance models for semi-probabilistic assessment of steel bridges. IABSE Symposium, Wroclaw, May 20-22, 2020, p. 1061-1068

České vysoké učení technické v Praze

Název: Pokroky v metodách hodnocení historických ocelových mostů

Autor: doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.

1. vydání

© Pavel Ryjáček, 2021

ISBN 978-80-01-06891-5