

# POSUZOVÁNÍ ŽIVOTNÍHO CYKLU V KAŽDÉ FÁZI ŽIVOTA NOSNÝCH KONSTRUKCÍ ■ LIFE CYCLE ASSESSMENT COVERING EACH SECTION OF STRUCTURAL SERVICE

Robert Veit-Egerer, Zdeněk Jeřábek, Miroslav Hubka

Předmětem příspěvku je informace o způsobu ověření dynamického chování nosných konstrukcí, umožňující v průběhu jejich života stanovení a kontrolu celkového provozního stavu nosné konstrukce, zatížitelnosti, funkčnosti a také spolehlivosti, vč. stavu podélného i příčného předpětí porovnáním změn dynamických charakteristik konstrukce. Pro tento úkol byla použita nedestruktivní metoda BRIMOS<sup>®</sup>, která odpovídá dynamické zatěžovací zkoušce a poskytuje další informace o nosné konstrukci. V rámci diagnostického průzkumu aktuálního provozního stavu nosné konstrukce se vychází z porovnání naměřeného stavu s výsledky dynamického výpočtu a mezními hodnotami dle relevantních norem (ČSN 73 6209, EN 1990/A1 a EN 1991-2). Příspěvek uvádí reference firem VCE a Infram na českém trhu v období let 2005 až 2009, které obsahují hodnocení stavu betonových konstrukcí. Provedené diagnostické průzkumy ukazují běžné aplikování – nezávisle na stáří a typu konstrukce a materiálu. ■ The present contribution describes integral life cycle analysis of load bearing structures which incorporates judgement about structural integrity, load bearing capacity, operational reliability – including maintenance condition state of internal prestressing – mainly by means of assessing dynamic behaviour and its probable changes. For that purpose, the non-destructive assessment method BRIMOS<sup>®</sup> is used, which corresponds to dynamic load tests but offers lots of additional information. In the course of a detailed assessment procedure certain characteristics extracted from dynamic measurements (under regular operational conditions) are compared to results from numerical simulations as well as to threshold values from relevant national and European codes (ČSN 73 6209, EN 1990/A1 a EN 1991-2). The present paper reflects reference projects from VCE & Infram on the Czech market realised between 2005-2009. They represent regular applications – independently on structural age, type or material.

## ZÁKLADY METODY

Vyhodnocení provozního stavu a kontrola odolnosti představují důležitý aspekt při zaručení bezpečného užívání konstrukce. V časech všeobecného snižování finančních prostředků žádají majitelé nosných stavebních konstrukcí efektivnější možnosti, jak zdokonalit vyhodnocení jejich provozního stavu a poskytnout spolehlivou prognózu životnosti na základě reálného chování. Středem zájmu provozovatelů či investorů jsou většinou mostní objekty.

Pro tento úkol lze doplňkově k vizuální inspekci (lokální diagnostika) používat i nedestruktivní diagnostiku BRIMOS<sup>®</sup> (BRIdge MOonitoring System), která je založená na snímání a vyhodnocování dynamických charakteristik (globální diagnostika – celkový stav konstrukce). Metoda byla vyvinuta s cílem použití bez narušení dopravního provozu. Podněty pro rozkmitání (buzení) konstrukce jsou způsobeny jak dopravou, tak i vlivy prostředí (= ambientní příčiny, např. vítr). Vyhodnocení a posudek měření se opírají především o nejreprezentativnější a dominantní charakteristické zatížení – a sice železničním nebo silničním provozem.

Provozní stav nosné konstrukce a jeho případná změna se projevují v jeho dynamické charakteristice (dynamické odezvě) – to znamená v relevantních dynamických parametrech (vlastní frekvence, tvar kmitání, intenzita kmitání, tlumení, vývoj dynamické tuhosti, statické a dynamické vertikální průhyby – vždy na celém mostním objektu). Na ce-



lou konstrukci jsou rozmístěny senzory zrychlení v předem stanoveném měřicím rastru, k zaznamenávání všech pro vyhodnocení potřebných informací.

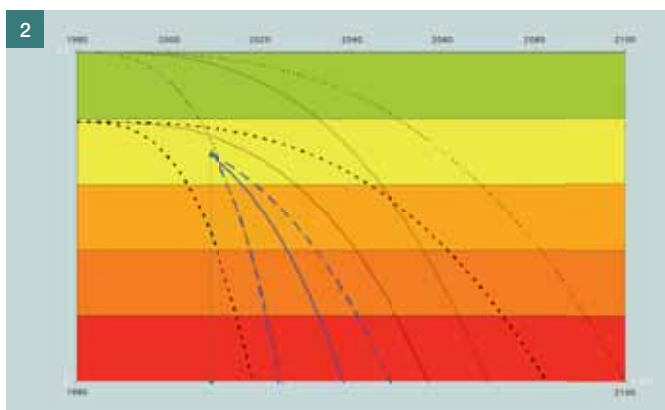
Nedestruktivní průzkumné měření dynamického chování popisovanou metodou odpovídá dynamické zatěžovací zkoušce, protože splňuje vyhodnocení předepsaných parametrů dle ČSN 73 6209 : 1996. Poskytuje ještě mnoho doplňkových informací o nosné konstrukci. Měřením je možné identifikovat poruchy nosné konstrukce již mnohem dříve, než jsou viditelné. Vedle hlavního účelu detekce a lokalizace poruch se vyhodnocuje účinek známých poruch.

## POSUDEK A KLASIFIKACE

Zařazení konstrukcí do klasifikace na základě dynamické charakteristiky dobře reprezentuje skutečné mechanické chování mostní konstrukce, které se porovnává s původně plánovaným, projektovaným chováním. Na základě klasifikace je stanoven celkový provozní stav nosné konstrukce, odolnost, funkčnost a stupeň bezpečnosti jejího používání.

Klasifikace zahrnuje dynamické měření, vizuální inspekci a případně porovnání reálného chování mostu s analytickým výpočtem. V rámci diagnostického průzkumu jsou z naměřených hodnot v rozsahu celé nosné konstrukce (NK) vy počítány a hodnoceny globální i lokální parametry:

- zobrazení a hodnoty spekter vlastních frekvencí
  - ⇒ dynamicky účinná tuhost a funkčnost nosné konstrukce,
- zjištění a zobrazení charakteristických tvarů kmitání mostu
  - ⇒ podmínky uložení (funkčnost),
- diagram obsahující přehled intenzity kmitání po celé NK
  - ⇒ lokalizace míst, kde může dojít k únavě materiálu,
- přehled tlumení přes celou konstrukci
  - ⇒ útlum vnesené energie, lokalizace problematických zón,
  - ⇒ logaritmičtý dekrement útlumu  $\theta$ ,
- vývoj dynamické tuhosti (odolnosti)
  - ⇒ mapování globální a lokální odolnosti v podélném a příčném směru (předpětí),
  - ⇒ lokalizace problematických částí NK,
- statické a dynamické vertikální průhyby ( $S_m$  a  $S_{max}$ ) každého pole,
  - ⇒ dynamický součinitel  $\delta_{obs}$ ,
- porovnání výsledků z analytického výpočtu s měřením dle ČSN 73 6209,
  - ⇒ koeficienty  $\Delta_{ij}$  a  $MAC_{ij}$ ,
- zařazení mostu do klasifikace,
- interpretace výsledků,
- posudek a doporučení.



Obr. 1 Zařazení do klasifikace provozního stavu a stupně bezpečnosti ■ Fig. 1 Judgement and rating according to BRIMOS®

Obr. 2 Stanovení životnosti na základě celkového posudku (stupeň bezpečnosti v čase) ■ Fig. 2 Enhanced lifetime prognosis of an existing bridge in terms of structural safety

Obr. 3 Mostní konstrukce, a) pohled, b) příčný řez ■ Fig. 3 Bridge structure, a) overview, b) cross section

Obr. 4 Přehled tlumení přes nosníky železničního mostu na trati Brno–Přerov ■ Fig. 4 Path of dissipated vibration energy along both spans

Pro rozšířenou interpretaci jsou vyhodnocení a výsledky porovnávány s jinými relevantními měřeními z databáze dosud provedených měření. Představený diagnostický postup podporuje proces rozhodování při plánování investic s ohledem na opatření k údržbě a sanaci.

### VÝBĚR APLIKACÍ V ČR

#### Předpjatý železobetonový most na trati Brno–Přerov

Předmětem studie je demonstrační, úvodní měření dynamické charakteristiky nosných konstrukcí železničního mostu Vyškov [7]. Cílem nedestruktivního měření bylo stanovení celkového provozního stavu, ověření současné funkčnosti a kontrola bezpečného užívání vzhledem k odolnosti mostního objektu. Protože tento mostní objekt reprezentuje řadu dalších mostů stejného typu a stáří, výsledky měření budou sloužit jako báze pro jejich posudky a podporovat proces rozhodování při plánování investic s ohledem na možná opatření k údržbě a sanaci.

Železniční most Vyškov, ve správě SŽDC, se nachází na trati Brno hl. n.–Přerov. Most o dvou polích (o rozpětích 26 m) a jedné koleji přemostuje silnici I/46 Vyškov-Prostějov-Olomouc. Nosnou konstrukci v každém poli tvoří dvojice prefab-

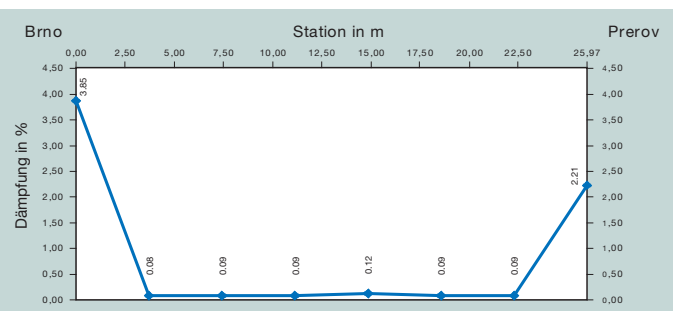
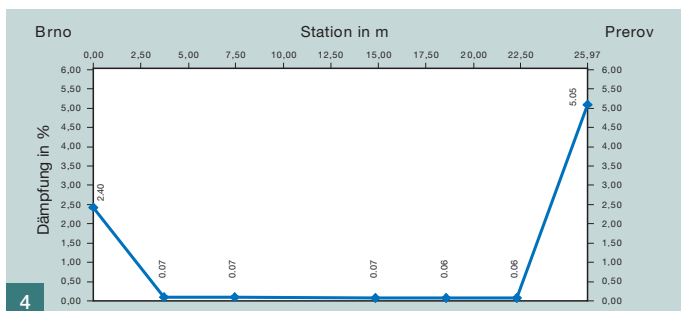
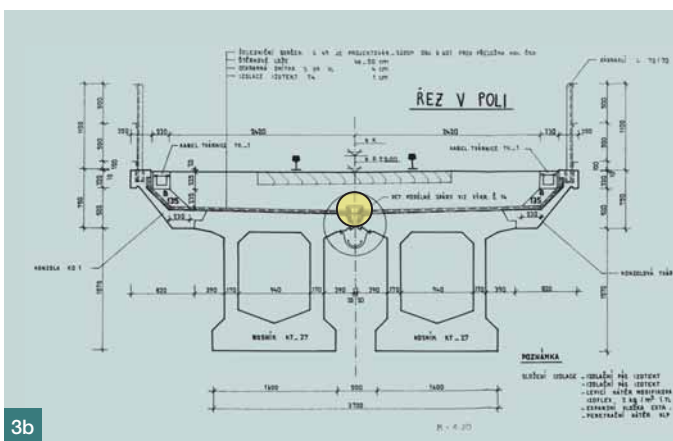
rikovaných, v podélném směru dodatečně předpínaných trémových železobetonových nosníků KT-27. Mostní objekt celkové délky 54 m byl postaven začátkem devadesátých let. Základním bodem diagnostiky je fakt, že konstrukci netvoří klasický spojitý nosník ale čtyři jednotlivé nosníky.

Měření bylo provedeno v říjnu 2005 během jednoho dne za pomoci měřicího rastru pěti trojrozměrně a čtyř jedno-rozměrně měřících senzorů zrychlení, které byly rozmístěny v komorách, souběžně s podélnou osou nosníků (obr. 3).

#### Výsledky měření

Nosníky reagují po podnětu vlakovou dopravou s výraznou, harmonickou oscilací. Tento harmonický výkyv je součástí zjištěného chování a potvrzuje dobrý celkový stav. Porovnání naměřených vlastních frekvencí (charakteristických tuhostí) na každém nosníku stavební konstrukce ukazuje pouze malé rozdíly, což poukazuje na přibližně stejný stav všech nosníků mostu. Mimořádné znaky, které by indikovaly degradaci tuhosti systému, nebyly nalezeny.

Vyhodnocení křivky tlumení přes celou konstrukci má tvar typický pro tento druh systému bez závad (obr. 4). Vnesená energie kmitání je podstatně disipována pouze nad ložisky (dominantní vliv systémového útlumu). Lokálně zvýšené



hodnoty, způsobené lokální disipací energie, pohybem trhlin či poruchami (případně i v předpětí), zjištěny nebyly (materiálový útlum).

Z mechanického hlediska je zde zjištěný vyhovující stavební stav potvrzen zejména faktem, že hodnoty tlumení nad kluznými ložisky jasně přesahují hodnoty nad pevnými ložisky (funkčnost mostního uložení).

Na základě dynamické charakteristiky byl odvozen dobrý stav nosníků (analýza parametrů vlastních frekvencí, tvarů kmitočtu, intenzity kmitání a tlumení konstrukce). Z průzkumu vyplývá, že funkčnost a zatížitelnost mostu je zajištěna v plném rozsahu. Měřené chování mostu potvrzuje původně plánované, očekávané chování. Zařazení železničního mostu Vyškov do klasifikace dle popisované diagnostické metody indikuje kategorii A – tj. velmi dobrý stav.

### Železobetonový komín Mladá Boleslav

Předmětem studie je úvodní měření dynamické charakteristiky monolitického železobetonového komínu v areálu firmy ŠKO-energo, dodavatele elektrické energie pro firmu Škoda Auto a tepla pro město Mladou Boleslav [6]. Komín slouží odvodu spalin z kotleny (obr. 5). Konstrukce má výšku 200 m a tvar komolého kužele (zúžení vnějšího poloměru ze 7,53 m na 3,62 m). Příčný řez ukazuje složenou konstrukci sestavenou ze železobetonové stěny, ochranného pouzdra (z kameninových komínovek) a tepelné izolace (z pálených křemelinových cihel). Tloušťka pouzdra se také postupně zužuje. Komín byl postaven v roce 1974.

Účelem měření je vyhodnocení provozního stavu, ověření současné funkčnosti, kontrola bezpečného užívání vzhledem k zaručení zatížitelnosti a odolnosti průmyslového komínu. Vedle toho je vyhodnocován vliv známých poruch a případná detekce a lokalizace doposud neviditelných poruch.

Výsledky slouží jako báze pro porovnání s teoretickými dynamickými parametry a pro porovnání s následujícími (budoucími) měřeními. Měření podporuje již zahájený proces rozhodování při plánování investic s ohledem na opatření k údržbě a sanaci.

Měření průmyslového komínu bylo provedeno v říjnu 2005 během jednoho dne za pomoci měřicího rastru trojrozměrně měřících senzorů zrychlení, které byly rozmístěny na ochozech, souběžně s osou komínu – výškový rozdíl ca. 35 m (obr. 5).

Komín má za sebou podstatnou část provozní životnosti. Výchozí, nepoškozený stav novostavby nebyl měřením ověřen. Vzhledem k posouzení současného chování byl dodatečně zhotoven analytický model nosné konstrukce meto-

dou konečných prvků a určeny modální parametry. Provedené analytické výpočty (očekávané hodnoty) komínu poskytují spolehlivou možnost porovnání současného chování s nepoškozeným referenčním stavem (obr. 6).

Z průzkumu dynamické charakteristiky konstrukce vyplynulo, že funkčnost komínu je zajištěna, selhání za současného stavu nehrozí a nejsou zapotřebí žádná okamžitá opatření (dodatečná stavební opatření či omezení provozu).

Porovnání výpočtů a měření však indikovalo systematickou degradaci tuhosti systému v horní čtvrtině komínu. Degradace vyžadovala ověření a kvantifikování dynamického působení výrazných trhlin za typického hlavního zatížení (silný vítr), které – na rozdíl od měření např. silničního mostu za neovlivněného nákladního provozu – nebylo převládající.

Ovlivnění zatížitelnosti poškozením a výraznými trhlinami lze ověřit a kvantifikovat na základě doporučeného měření během jednoho ročního cyklu. Teprve na základě ročního průběžného měření lze rozhodnout o přiměřenosti případných sanačních opatření.

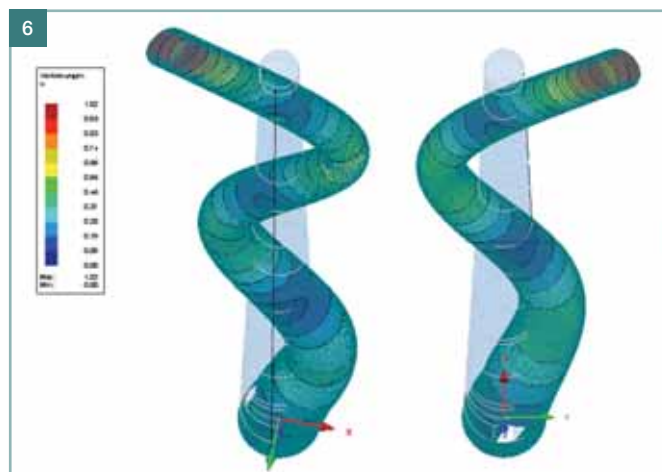
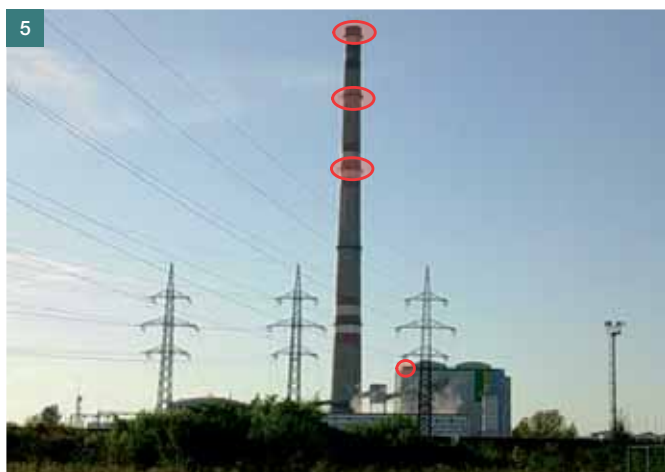
Průzkum v říjnu 2005 indikoval systematickou degradaci tuhosti v horní čtvrtině komínu. V oblasti vyšších vlastních frekvencí, které jsou vyvolány v rámci přenášení vneseného zatížení za aktivování lokální odolnosti nosné konstrukce (odolnost v ohybu), byl znát pokles vyšších měřených vlastních frekvencí oproti očekávaným hodnotám.

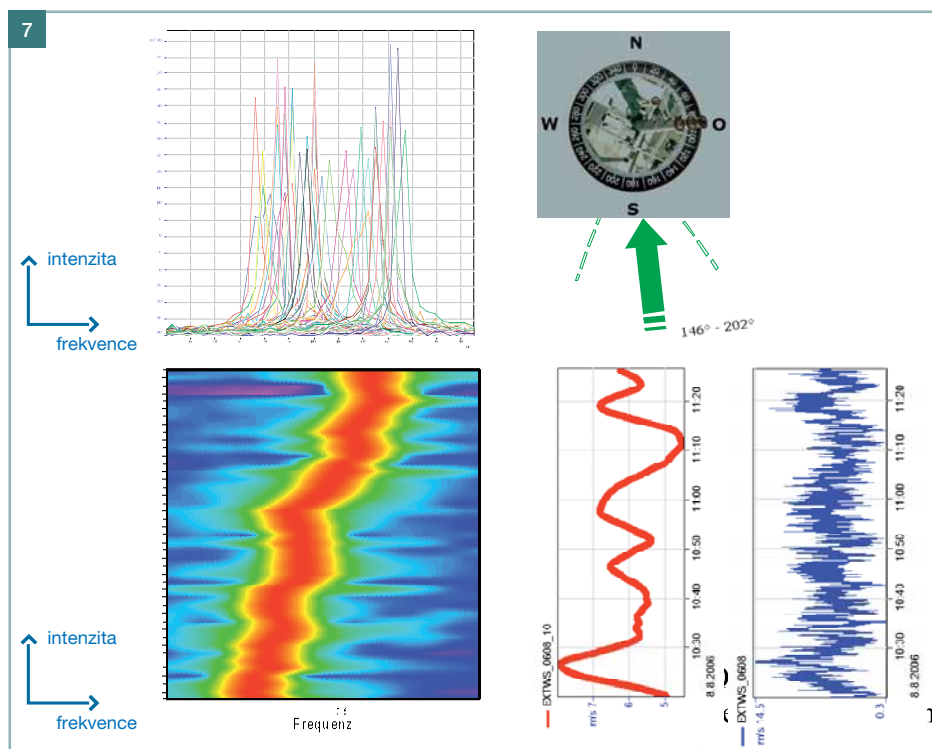
Z této situace vyplynula koncepce a provozování stálého monitorovacího systému. Účelem diagnostického úkolu bylo zejména stanovení zatížitelnosti vzhledem k dalšímu provozování továrního komínu. Monitorovací interval jednoho uzavřeného ročního cyklu obsahuje dostatečnou četnost silného zatížení větrem a slouží jako doklad o tom, jak závažně je nosná konstrukce ovlivněna případným působením výrazných trhlin, poruch a degradace materiálu a jejich vlivem na zatížitelnost a odolnost konstrukce v časovém úseku provedených měření.

Permanentní monitorovací systém byl na průmyslový komín instalován mezi 15. a 19. květnem 2006. Měřené soubory obsahují informace o kmitání (dva senzory zrychlení), teplotě a o rychlosti a směru větru. Zároveň byl během ročního cyklu pozorován dilatační pohyb dvou vybraných svislých trhlin (obr. 8b).

Monitorovací systém byl dodatečně vybaven dálkovým přístupem (s pomocí telekomunikační techniky), což umožňuje pravidelnou kontrolu, údržbu a servis systému a kontrolu zaznamenaných dat.

Vzhledem k degradaci a potřebě stanovení zatížitelnosti byla naměřená data podrobně vyhodnocena za střídavé-





Obr. 5 Měřicí rastr senzorů na čtyřech místech podél stavební konstrukce – monitorování rozhodujících parametrů na nosné konstrukci a na střeše vedlejší budovy (kotelna) | Fig. 5 Sensor layout related to the investigated smokestack in order to assess the key performance indicators

Obr. 6 Analytická odezva konstrukce | Fig. 6 Modal structural response according to finite element analysis

Obr. 7 Vývoj zatžitelnosti pomocí dynamické tuhosti E4FBAy (3,1 – 3,8 Hz) pod vlivem silného větru – permanentní monitorování během jedné reprezentativní hodiny v srpnu 2006 | Fig. 7 Trend of dynamic stiffness in Y-direction (3.1 – 3.8 Hz) during permanent monitoring in a certain timeframe of 1.0 h under strong wind-loading (August 2006)

ho vlivu zatížení pomocí frekvenční analýzy, která zohledňuje střídavou intenzitu vnesené energie (obr. 7).

Na základě vybraných úseků, které obsahují převážně nepřetržitě silné zatížení větrem (časové období květen 2006 až červenec 2007), byla provedena studie citlivosti vývoje dynamické tuhosti.

### Výsledky průzkumu

Z naměřených hodnot vyplývá, že zatžitelnost a funkčnost nosné konstrukce v době průzkumu už nejsou zajištěny v plném rozsahu. Selhání se za současného stavu při vysokém zatížení nedá vyloučit.

Aplikovaná metodika prokazuje, že průběžné monitorování jednoho ročního cyklu v rámci střídavého namáhání podél východo-západní osy indikuje pokles zbývající zatžitelnosti v ohybu na 67 % a podél severo-jihní osy na 78,6 %.

V rámci mezinárodních studií podobně problematických komínových konstrukcí byly za simulování realistických podmínek – zejména implementace lokálně degradovaných částí – obdrženy zbývající zatžitelnosti v oblasti 70 %, což také potvrzuje posudek předloženého diagnostického průzkumu.

Hlavním doporučením bylo konstrukci trvale zesílit volnou

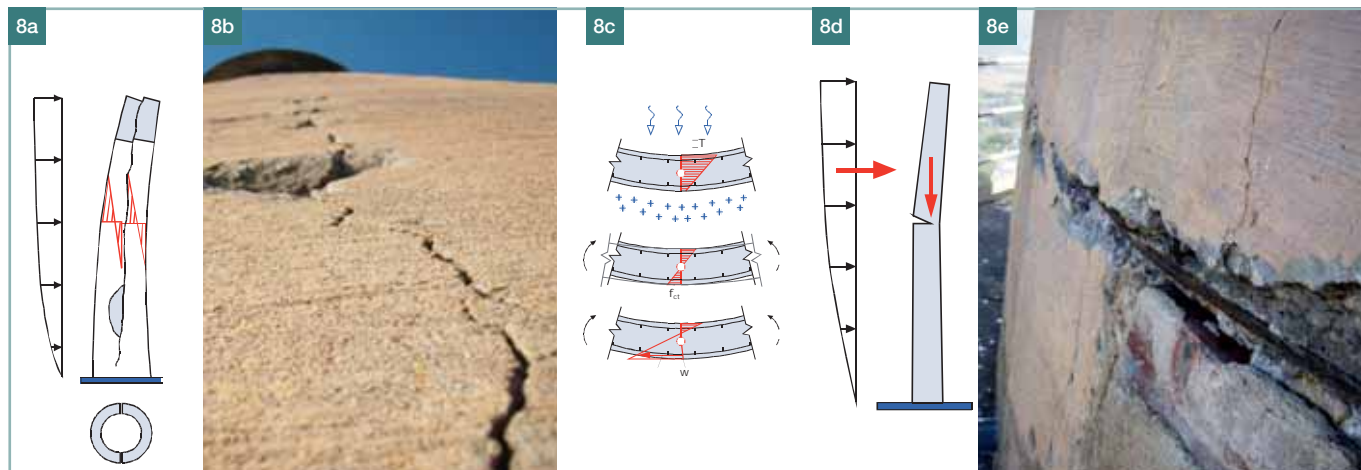
výztuží (jednotlivé předpínací prvky – monostrandy) v určitých výškových rozmezech. Cílem je obnova celkové odolnosti. Předpětím by byly do železobetonového dřívku vneseny normálové tlakové síly. Žádoucí přenášení sil, podporované třením v trhlínách, by bylo nutné dodatečně zajistit zainjektováním závažných trhlin. Realizovaným postupem by bylo možné kontrolovat stav zesílení a hodnoty účinných výztužných sil.

### Silniční most přes trat' ČD za obcí Komořany

Silniční most ev. č. 13-041 za obcí Komořany přemostňuje železniční trat' ČD s dvoupruhovou vozovkou. Jedná se o mostní konstrukci o dvou polích (rozpětí 16,72 a 46,43 m).

Obr. 8 Objekt ŠKO-energo, a) přírůstek tlakového napětí v rozpuhaném dřívku, b) dělicí svislé trhliny, c) mechanismus tvoření trhlin v komínových konstrukcích ze železobetonu, d) ohrožení překlopením vzhledem k nedostatečné odolnosti (plastický kloub) pod silným zatížením, e) přetížení kruhové výztuže v oblasti ochozu č. 5

| Fig. 8 Smokestack ŠKO-energo, a) increase of compressive stress in fragmented shaft, b) longitudinal crack, c) mechanism of crack initiation and crack propagation, d) threat of push-over scenario in cases of strong wind and insufficient load-bearing capacity, e) overstressed radial reinforcement





Mostovka má celkovou šířku cca 13 m. Příčný řez mostní konstrukce je tvořen devíti kusy předpjatých stavebních prefabrikátů tvaru I, které jsou příčně sepnuty předpínacími kabely přes dolní i horní pásnice. Mostní objekt byl postaven v roce 1961.

Předmětem studie bylo stanovení zatížitelnosti vzhledem k zaručení bezpečného užívání mostního objektu. Konstrukce se ukazuje v problematickém stavu (obr. 9). Jednou z hlavních součástí průzkumu byla analýza vloženého pole, které vyžaduje celkově (uložení) i lokálně (příčná sepnutí) maximální pozornost.

Měření chování silničního mostu se uskutečnila 6. března a 31. května za neomezeného silničního a železničního provozu. Byl použit měřicí rastr senzorů zrychlení, což umožnilo určit dynamickou charakteristiku nosné konstrukce v podélném a v obou příčných směrech. Dodatečně byly pomocí laseru monitorovány statické a dynamické vertikální průhyby v hlavním poli.

Měřená dynamická odezva (vlastní frekvence, příslušné tvary kmitání v příčném směru, tlumení) se pod vlivem vysokého zatížení silniční dopravou objevuje v širokém flukuačním pásmu – chování se zásadně změní oproti plánovanému (obr. 10). Tento jev indikuje degradaci tuhosti konstrukce, zejména v oblasti vloženého pole (podstatně omezená funkčnost příčného předpětí). Přírůstek zatížení ukazuje, že jednotlivé části příčného ztužení (sepnuté prefabrikáty tvaru I) nepřenesou plně vnesené zatížení, jak by bylo u tohoto druhu konstrukce žádáno, ale pouze částečně – hlavně tehdy, když je aktivována torzní odolnost nosné konstrukce. Tato degradace již ovlivňuje celkové chování nosné konstrukce.

Kvůli zřejmé degradaci a vzhledem k potřebě stanovení zatížitelnosti byla naměřená data podrobně vyhodnocena za střídavého vlivu zatížení. Na základě představeného pracovního diagramu mostní konstrukce [4] byla provedena studie citlivosti vývoje dynamické tuhosti a pozorovány následky či ovlivnění odolnosti v ohybu a kroucení pro vybrané časové úseky dopravního provozu. Určení vlivu různého zatížení vyžadovalo informace o hmotnosti zatížení (poskytly spedice, kterým vozidla patří) a zároveň o monitorovaném vertikálním průhybu způsobeném danou hmotností, ale hlavně určení prahových hodnot zatížení, při kterých se konstrukce chová odlišně.

Aplikovaná metodika prokazuje, že je v rámci vnesení různého zatížení silničním provozem aktivována odolnost v ohybu v rozsahu 27 až 100 %. Odolnost v kroucení je v rámci střídavého zatížení aktivována v rozsahu 55 až 90 %.

Zatížení vyšší než ca 25 t vyvolává odezvu skutečného cho-

vání, která se odchyluje od očekávané referenční odezvy (chování předpokládané vypočtem).

Zařazení silničního mostu ev. č. 13-041 za obcí Komořany dle klasifikace je do kategorie C – tj. problematický provozní stav. Hlavním důvodem je podstatně omezená funkčnost příčného předpětí v oblasti vloženého pole.

### Závěry průzkumu

Z průzkumu vyplývá, že zatížitelnost a funkčnost nosné konstrukce už nejsou zajištěny v plném rozsahu. Jestliže zatížení dopravou bude ponecháno beze změny, nedá se za současného stavu vyloučit selhání.

Pro zbývající provozní životnost neboli do provedení opravných opatření bylo doporučeno omezit dopravu na jednotlivá vozidla s maximální okamžitou hmotností do 25 t.

### Estakáda přes Masarykovo nádraží – studie citlivosti během postupného předpínání kabelů [3]

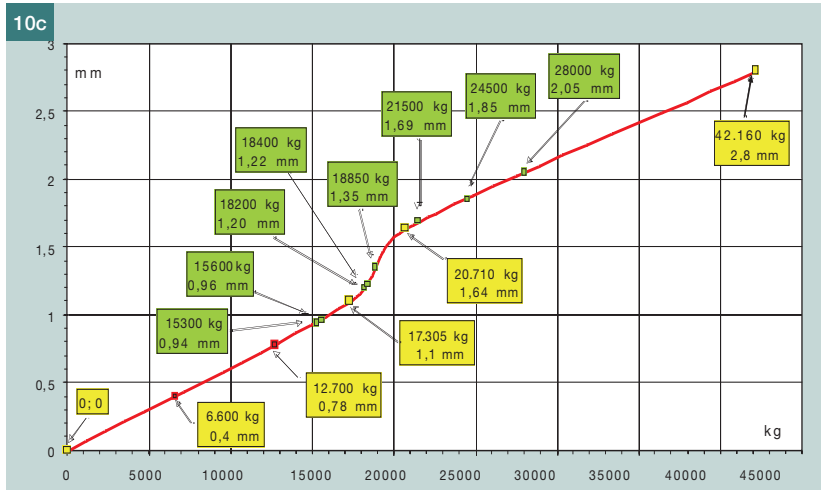
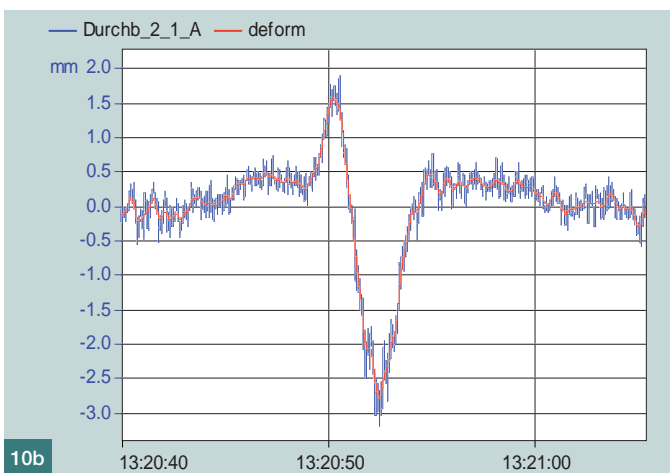
Předmětem studie je dokumentace demonstračního měření s cílem prokázat citlivost použité metody vzhledem k identifikaci možných poruch v příčném předpětí nosné konstrukce. Firma VCE se v posledních letech zabývala diagnostickými úkoly tohoto druhu jak v německé, tak i v rakouské dálniční síti. V rámci analýz mnoha mostních konstrukcí byly identifikovány a lokalizovány podstatné poruchy v jejich podélném a příčném předpětí.

V prvním poli nosné konstrukce estakády se pro účel demonstrace citlivosti a možnosti metody použily čtyři kabely horního příčného předpětí: Z011101, Z011102, Z011201 a Z011202 (obr. 13). V rámci diagnostiky bylo provedeno výchozí lokální měření dynamického chování mostu s nepředepnutými kabely (simulace poškozeného stavu) a následně během postupného předpínání kabelů. Mezi předpínáním jednotlivých kabelů bylo vždy zopakováno stejné měření.

Dynamické měření bylo provedeno 7. února 2008. Měřicí přístroj byl postaven během celého měření na stejném místě na chodníku převyšlého konce (směr Praha Hlavní nádraží). K přístroji byl připojen externí senzor zrychlení, který byl postupně přesunován jednak podél obou převyšlých konců a jednak rovnoběžně s podélnou osou samotné mostovky.

Senzory byly rozmístěny v předem stanoveném měřicím rastru senzorů po cca 1/12 pole (= 2,875 m, na rozhraní prefabrikátů), což odpovídá umístění příčných kabelů sestavených ve dvojicích vždy na kraji prefabrikátu (obr. 12).

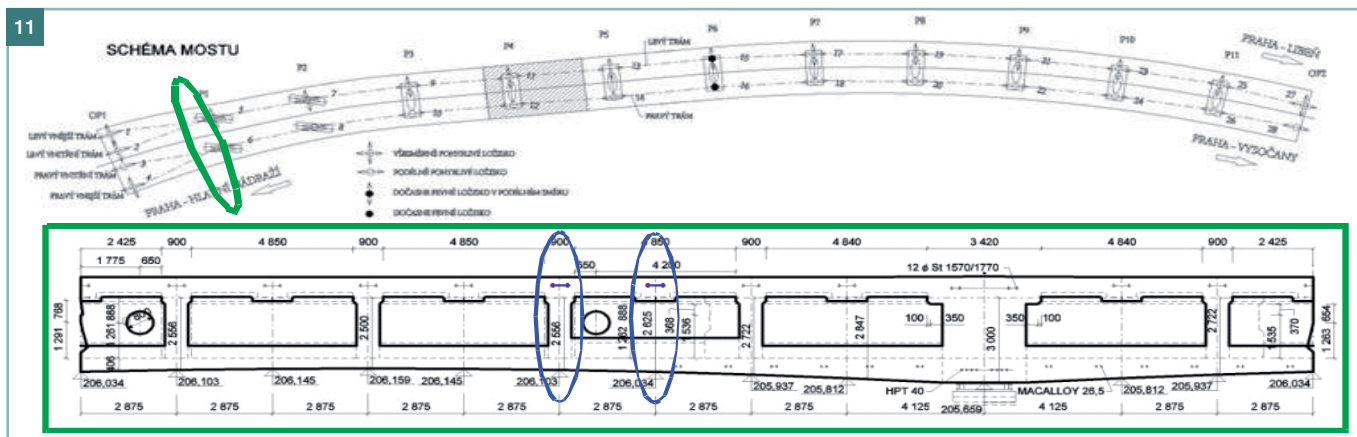
Měření bylo provedeno během jednoho dne za ambientních podmínek, tj. vítr a normální, neomezený silniční provoz pod železničním mostem, stavební práce v okolí mostu



Obr. 9 Mostní objekt přes trať ČD za obcí Komořany, a) celkový pohled, b) dokumentace nedostatečné funkčního předpětí v příčném směru prefabrikovaných nosníků | Fig. 9 Road bridge Komořany, a) overview, b) documentation of insufficient prestressing of prefabricated concrete elements (I-beams)

Obr. 10a, b, c Rozšířený pracovní diagram mostní konstrukce vzhledem k stanoveným zatížením | Fig. 10a, b, c Enhanced loading-displacement diagram in order to determine the tonnage of unknown truck passages for the determination of load bearing capacity

Obr. 11 Výkresová dokumentace estakády a označené pozice původně vynechaných a teprve následně, postupně předepnutých kabelů horního předpětí, a) půdorys, b) podélný řez | Fig. 11 Bridge documentation and investigated area including 4 tendons in the transverse direction (upper slab) that were left out and added supplementary, a) ground view, b) longitudinal section



a na mostě. Nosná konstrukce nebyla během měření přímo zatěžovaná železniční dopravou, ale hlavně byla rozkmitávána energií silničního provozu, která se přenášela pilíři. Dotečně je výrazně znatelný provoz stavebních strojů a práce na mostě a v blízkém okolí.

V rámci diagnostického průzkumu bylo vytvořeno několik trendkart (Trendkarta je termín pro graf vývoje (karty trendu) frekvencí vlastního kmitání v závislosti na čase. Graf frekvencí může být vykreslen i v závislosti na poloze místa měření (kmitání)). První trendkarta (obr. 13) – vytvořená pomocí referenčního senzoru zrychlení, který stál během celého měření na stejném místě – obsahuje pouze výraznou křivku relevantních vlastních frekvencí, které nejlépe popisují tuhost horní desky v příčném směru mezi příčnicí. Pro vyhodnocení a posudek bylo nutno izolovat vyšší vlastní frekvence, které souvisí s lokálním kmitáním horní desky v příčném směru mezi příč-

nicí. V rámci analytického výpočtu byly tyto frekvence identifikovány v oblasti 65 Hz.

Výsledky vyhodnocování monitorování ukazují jednu jednoznačnou křivku. Protože na začátku měření před zahájením předpínání na mostní konstrukci vyjel jeřáb, který zvýšil kmitající hmotu (za konstantní tuhosti stavební součásti), je poznat nejdříve redukce pozorované dominantní vlastní frekvence. Následně se vytvoří charakteristika, která zřetelně koreluje s jednotlivými etapami postupného předpínání. Přírůstek stupňů předpínání je nevyhnutelně spojen s přírůstkem hodnoty pozorované dominantní vlastní frekvence, což je důsledkem postupného účinného zvyšování tuhosti horní desky.

Dále bylo ukázáno, jak jsou vyhodnocovány trendkarty podle frekvencí a staničení. To znamená, že lze postupně sledovat vývoj dynamické tuhosti v podélném směru horní desky

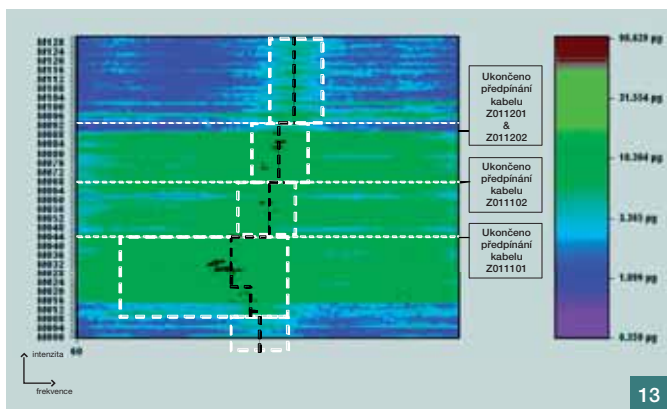


Obr. 12 Měřicí rastr senzorů podél okraje stavební konstrukce ■ Fig. 12 Measurement sensor grid distributed along the edges

Obr. 13 Vývoj dynamické tuhosti během diagnostického měření (časový úsek 1 den); referenční senzor ve vertikálním směru; 60 až 70 Hz ■ Fig. 13 Trend of dynamic stiffness, eigenfrequencies between 60-70 Hz observed during the entire measurement (reference sensor – vertical direction)

Obr. 14 Vývoj dynamické tuhosti v podélném směru převislého konce – směr Praha hl. n. (dle etap postupného předpínání); staničení všech senzorů ve vertikálním směru; 60 až 70 Hz ■ Fig. 14 Successive increase of the load-bearing capacity of the track slab's cantilevers as a consequence of supplementary installation of tendons (pattern of eigenfrequencies 60-70 Hz according to the stationing)

Obr. 15 Estakáda Sluncová, a) pohled, b) měření mostovky, c) měření dolní desky ■ Fig. 15 Railway bridge Estakáda Sluncová, a) overview, b) measurement of the bridge deck, c) measurement of the bottom slab

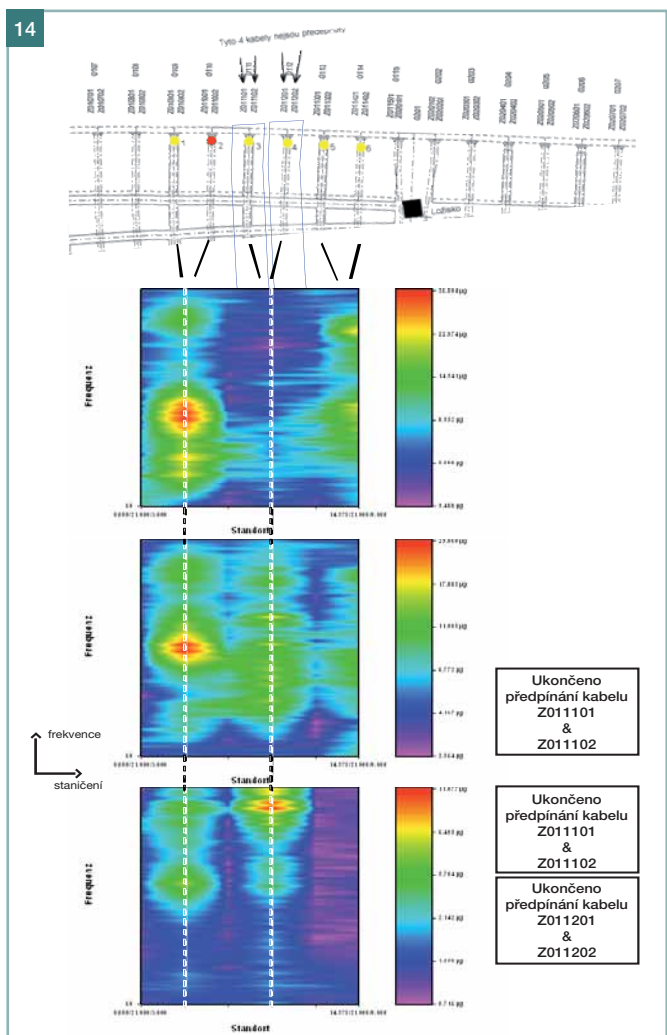


podle staničení užívaných senzorů zrychlení (v místě provedeného měření).

Už dříve charakterizovaný jev účinného zvyšování tuhosti horní desky postupným předpínáním je zde zřejmý. Vyhodnocení v obr. 14 zdůrazňuje, že ze začátku jsou aktivovány pouze lokální frekvence dynamické odezvy, které souvisejí se staničením už před demonstračním měřením předepnutých zón (Z0109 & Z0110 stejně jako Z0113 & Z0114). V této fázi (před předepnutím) zůstává frekvenční pásmo příčné nepředepnuté oblasti Z 0111 a Z 0112 bez účinné dynamické odezvy.

Další výsledky velice jasně ukazují následek a účinnost předepnutí kabelů Z0111. Po závěrečném předepnutí kabelů Z0112 je poznat úspěšné vytvoření plné tuhosti.

V této souvislosti je nutno poznamenat, že analýzou dynamické tuhosti, aktivované předpínáním lze ukázat, jak se hodnoty příslušných vlastních frekvencí zvyšují s postupným zvyšováním vneseného předpětí. Pomocí demonstračního měření byla prokázána citlivost metody vzhledem k identifikaci možných poruch v předpětí nosné konstrukce.



### Nové spojení Praha – Železniční estakáda Sluncová

Předmětem studie bylo ověření výchozího stavu (novostavby) nosné konstrukce mostu „Železniční estakáda Sluncová“ podrobnou dynamickou analýzou (obr. 15). S ohledem na ČSN 73 6209 byl zároveň zhotoven analytický model nosné konstrukce metodou konečných prvků a byly určeny modální parametry konstrukce (vlastní frekvence a tvary vlastního kmitání).

Účelem měření je diagnostické testování jako výchozí podklad pro dynamické monitorování stavu konstrukce v příštích letech, jehož cílem je ověření celkového stavu konstrukce, odolnosti a funkčnosti se zaměřením na stav předpětí.

15. a 16. října 2008 byla provedena následující měření dynamického chování mostu:

- globální chování železničního mostu v rastru senzorů zrychlení po 1/8 rozpětí pole, umístěném a přemísťovaném po chodníku u 601. a 602. koleje,
- lokální chování horní desky (mostovky),
- lokální chování dolní desky,
- vertikální průhyby nosné konstrukce.

Modální parametry byly vyhodnoceny globálně i lokálně, tzn. pro celou mostní konstrukci i pro každé měřené místo.

Protože do dokončení rekonstrukce navazujícího traťového úseku Libeň–Běchovice je přes most vedeno jen asi 72 vlaků za den plus několik manipulačních jízd, bylo zatížení mostu během měření – kromě ambientních vlivů, tj. vítr, železniční provoz na mostě a pod mostem – simulováno



15a



15b



15c

zkušební vlakovou soupravou, sestavenou z lokomotivy řady 753 OKDD (72 t) a dvou ložených vozů Faccs (2x 72 t), o celkové hmotnosti 216 t, která koordinovaně a opakovaně přejížděla mostní konstrukci po 601. koleji směrem k nádraží Praha–Libeň rychlostí 70 až 80 km/h (z kopce). Souprava se pak vždy vracela rychlostí 30 až 40 km/h zpět (do kopce) k Hlavnímu nádraží.

Analýza vývoje frekvenčních spekter během celého měření podle délky nosné konstrukce (srovnatelná s dynamickou odolností) ukazují lineární, svislý průběh relevantních vlastních frekvencí. Tento jev indikuje normální charakteristické chování mostu a potvrzuje pozitivní hodnocení z hlediska zatížitelnosti a funkčnosti. Posudek platí jak pro globální provozní stav (dynamické chování hlavních částí nosné konstrukce), tak i pro lokální provozní stav (dynamické chování horní a spodní desky).

Porovnání měření a výpočtu ukazují dobrou shodu v dynamické charakteristice a potvrzují pozitivní posudek o provozním stavu.

Odchyly vlastních frekvencí  $f_{(j)obs}$  zjištěných měření se pohybují proti teoretickým hodnotám  $f_{(j)teor}$  převážně pod mezními hranicemi podle ČSN 73 6209, což je v pořádku. Důvodem je nezapočtení tuhosti některých částí průřezu (štěrkové lože, kolej, chodník). Pouze vypočtená první vlastní frekvence se liší od naměřené frekvence více, než je uvedeno.

Vyhodnocením a porovnáním tvarů kmitání (koeficient korelace modální analýzy  $MAC_{(j)}$ ) byla dosažena numericky vysoká shoda mezi měřením a teoretickým výpočtem. Většina vypočtených koeficientů  $MAC$  se blíží ideální hodnotě 1 (obr. 16).

V rámci podrobného diagnostického průzkumu výchozího stavu nosné konstrukce Estakády Sluncová jsou splněny jak požadavky české normy ČSN 73 6209, tak i relevantní požadavky evropských norem EN 1990/A1 a EN 1991-2.

Mimo jiných uvedených, relevantních parametrů je tu ukázáno na:

- přípustné maximální zrychlení,
- mezní vlastní frekvence prvního kmitu v ohybu,
- hodnoty koeficientu tlumení  $\zeta$ ,
- naměřené dynamické průhyby (tj. statické průhyby  $S_m$  včetně dynamického součinitele  $\delta_{obs}$ ).

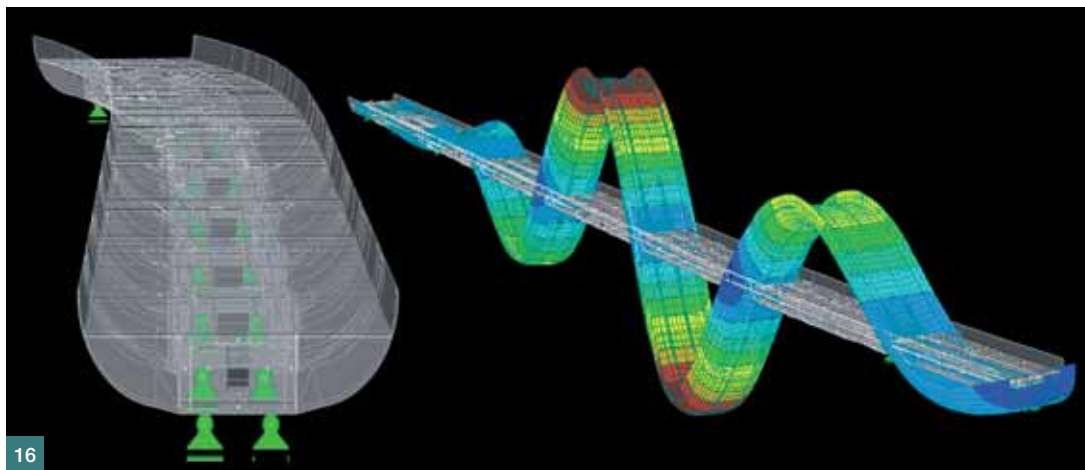
### Nové spojení Praha – Železniční estakáda přes Masarykovo nádraží – ověření výchozího stavu [1]

Předmětem studie je ověření dynamického chování konstrukce novostavby „Železniční estakády přes Masarykovo nádraží v km 3,993 HL“ umožňující v průběhu životnosti kontrolu spolehlivosti konstrukce vč. stavu podélného i příčného předpětí porovnáním změn dynamických charakteristik konstrukce. Při vyhodnocení dynamického chování se vycházelo z porovnání naměřeného stavu s výsledky dynamického výpočtu a mezními hodnotami dle norem.

Dynamické chování mostu bylo měřeno po jeho uvedení do provozu ve dnech 5. až 8. května 2009. Vyhodnocení a posudek měření se opírají především o nejreprezentativnější a dominantní charakteristické zatížení – a sice železničním provozem.

#### Byla provedena měření:

- globální chování železničního mostu v rastru po rozhraní jednotlivých obloukových prefabrikátů, tj. 1/14 rozpětí 1. pole, 1/12 rozpětí 2. pole, 1/13 rozpětí 3. až 11. pole a 1/10 rozpětí 12. pole; senzory byly umísťovány na levé i pravé římsce vždy na rozhraní prefabrikátů, na rozhraní mezi monolitem nad uložením a okolními prefabrikáty a na osu monolitického nadpodporového příčnicku,
- lokální chování horní desky (mostovky) v rastru jako u globálního sledování,

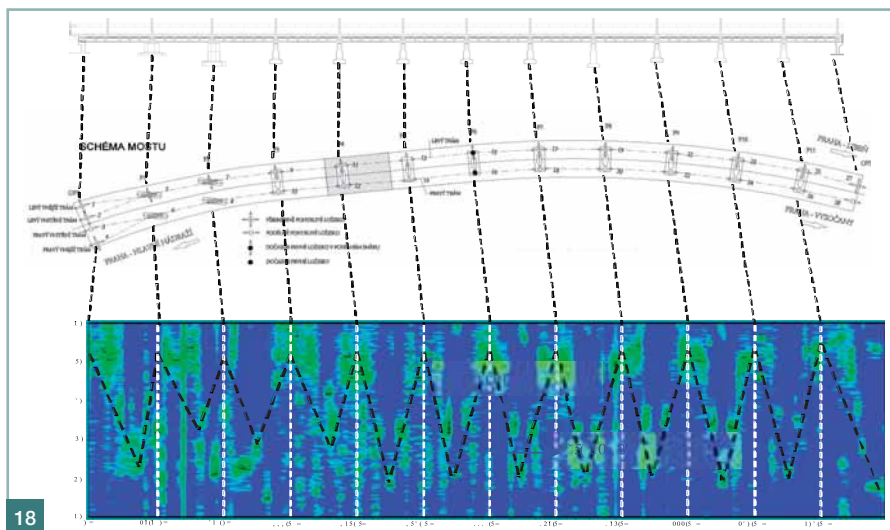


Obr. 16 Železniční most, modelován metodou konečných prvků ■  
Fig. 16 Finite element model of the railway bridge

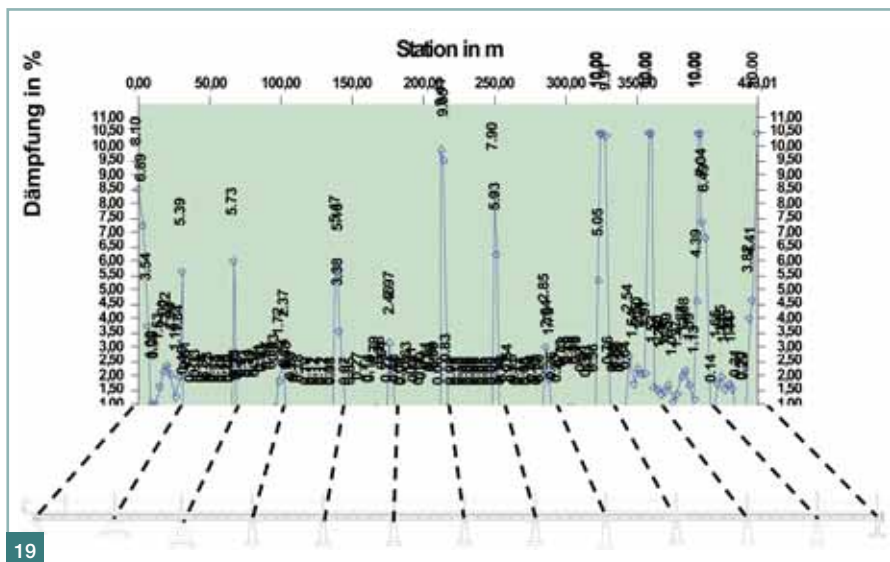
Obr. 17 Dokumentace měření mostovky, rozmístění senzorového rastru na římsách – půdorys celku a detail ■  
Fig. 17 Documentation of the the bridge deck measurement, distribution of the sensor grid along the edge beam – ground view and details

Obr. 18 Trend dynamické tuhosti spodní desky ve vertikální směru (lokální odezva v pozorovaném, relevantním frekvenčním pásmu 40 až 95 Hz) podle staničení všech senzorů zrychlení v prostřední komoře nosné konstrukce => zřetelná křivka ve tvaru V naměřených vlastních frekvencí => je znát silný vliv geometrických podmínek (po délce proměnlivá ohybová tuhost desky, rozpětí uvnitř komor, způsob vytvoření pevného uložení atd.) ■ Fig. 18 Trend of dynamic stiffness of the bottom slab in the central cell of the bridge's box girder according to the stationing (pattern of local response, 40-95 Hz) => visible pattern of eigenfrequencies in the form of a V due to strong affection by the geometrical properties (varying slab thickness, vibration length, local internal prestressing, level of restraint)

Obr. 19 Přehled tlumení na mostní konstrukci dle měření podél pravé římsy vyvolaného namáháním v ohybu základní vlastní frekvence (= 4,34 Hz) ■ Fig. 19 Path of dissipated vibration energy along the entire bridge length released with bending stressing belonging to the natural frequency (=4,34 Hz)



18



19

• lokální chování dolní desky v nepravidelném rastru podle umístění dolního předpětí.

Zatížení mostu během měření bylo dáno, kromě ambientních vlivů (vítr), železničním provozem na mostě a provozem pod mostem. Běžná rychlost vlaků na mostě je 40 km/h. Současně s pohybem vlaků na mostě probíhal posun jednotlivých lokomotiv rychlostí do 40 km/h.

**Hodnocení dynamické tuhosti – odolnosti předpjaté konstrukce**

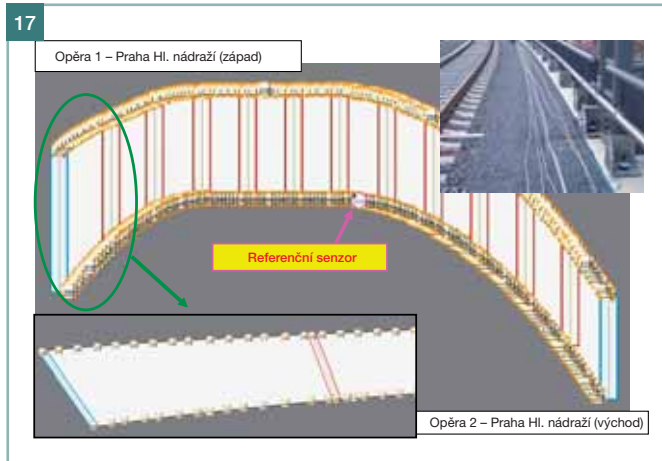
Analýza vývoje frekvenčních spekter (srovnatelné s dynamickou odolností) během celého měření a podle délky nosné konstrukce ukazuje lineární, stabilní průběh relevantních vlastních frekvencí. Tento jev indikuje normální charakteristické chování mostu a potvrzuje pozitivní hodnocení z hlediska zatžitelnosti a funkčnosti. Posudek platí jak pro globální provozní stav (dynamické chování hlavních částí nosné konstrukce – předepnuté v podélném směru), tak i pro lokální provozní stav (dynamické chování horní a spodní desky – obě předepnuté v příčném směru), (obr. 18 a 19).

**Analýza disipace vnesené energie**

Vyhodnocené podélné globální hodnoty disipace energie kmitání (nevrátne přeměny vnesené mechanické energie v jiné druhy energie na základě tlumení) odpovídají předpokládaným křivkám. Vyhodnocené křivky disipace vnesené energie z mechanického hlediska indikují uspokojivou funkčnost uložení. Nízké hodnoty uvnitř mostních polí potvrzují vysokou soudržnost a funkčnost interního předpětí.

**Hodnocení a klasifikace**

Celkový a lokální provozní stav určený dynamickým měřením je dobrý. Z vý-



sledků průzkumu vyplývá, že zatžitelnost a funkčnost nosné konstrukce jsou zajištěny v plném rozsahu.

Zařazení mostu na základě měření v podmínkách daných zatížením běžným provozem na mostě dle klasifikace je do kategorie A – tj. velmi dobrý stav.

V rámci podrobného diagnostického průzkumu výchozího stavu nosné konstrukce jsou splněny jak požadavky české normy ČSN 73 6209 Zatěžovací zkoušky mostů, tak i relevantní požadavky evropských norem EN 1990/A1 a EN 1991-2.

#### Literatura:

- [1] Veit-Egerer R., Jeřábek Z.: Nové spojení Praha – Železniční Estakáda přes Masarykovo nádraží – Ověření výchozího stavu průzkumným měřením dynamického chování metodou BRIMOS® v souladu s ČSN 736209, Sb. 15. konf. Železniční mosty a tunely, SUDOP Praha, 2010
- [2] Veit-Egerer R., Jeřábek Z.: Nové spojení Praha – Železniční Estakáda Sluncová – Ověření výchozího stavu průzkumným měřením dynamického chování metodou BRIMOS® s ohledem na ČSN 736209, Sb. 14. mezinár. sympozia Mosty, ISBN 978-80-86604-43-5, Sekurkon, 2009
- [3] VCE & Infram: Estakáda přes Masarykovo nádraží – Studie citlivosti dynamického chování mostu s nepředepnutými kabely horního příčného předpětí (simulace poškozeného stavu) a následné postupné předpínání kabelů – Analýza odolnosti v příčném směru metodou BRIMOS®, Demonstrační měření, vyhodnocení, analytický výpočet a posudek, Zpráva pro SSZ, a. s., oblast specializované činnosti, závod Řevnice, duben 2008, Vídeň a Praha
- [4] Veit-Egerer R., Hubka M.: Silniční most přes trať ČD za obcí Komořany – Dynamické chování vzhledem k provoznímu stavu a zatžitelnosti metodou BRIMOS®, Sb. 13. mezinár. sympozia Mosty 2008, Sekurkon, Brno, duben 2008, ISBN 978-80-86604-35-0
- [5] Veit-Egerer R., Jeřábek Z.: Tovární komín Mladá Boleslav – Permanentní monitorování dynamického chování metodou BRIMOS® vzhledem k provoznímu stavu a zatžitelnosti; Sb. 18. mezinár. sympozia Sanace 2008, SSBK, Brno, květen 2008, ISSN 1211 – 3700
- [6] Jeřábek Z.: Monolitický železobetonový komín Mladá Boleslav – Dynamická charakteristika nosné konstrukce metodou BRIMOS®, Sb. 16. mezinár. sympozia Sanace 2006, SSBK, Brno, květen 2006, ISSN 1211 – 3700
- [7] Veit-Egerer R., Wenzel H.: Předpjatý železobetonový most na trati Brno–Přerov – nedestruktivní celková diagnostika metodou BRIMOS®, Sb. 11. mezinár. sympozia Mosty 2006, Sekurkon, Brno, duben 2006, ISBN 80-86604-26-8
- [8] Wenzel H., Veit-Egerer R.: BRIMOS® BRIdge MONitoring System – Diagnostika mostů založená na ambientním měření kmitání; Sb. 10. mezinár. sympozia Mosty 2005, Sekurkon, Brno, duben 2005, ISBN 80-86604-17-9

## ZÁVĚRY

Diagnostická metoda BRIMOS® byla vyvinuta postupně během posledních patnácti let a opírá se o zkušenosti z více než čtyř set měřených a vyhodnocených stavebních konstrukcí a dvaceti pěti stálých monitorovacích systémů na celém světě.

V praxi je nejvíce požadováno ověření stavu podélného i příčného předpětí či skutečného namáhání lan závěsů a táhel.

Provedené diagnostické průzkumy ukazují běžné aplikování, nezávisle na stáří a typu konstrukce a materiálu. Posudek o provozním stavu a životnosti je možno vystavit v každé fázi životního cyklu konstrukce. Teprve na základě diagnostického průzkumu dynamického chování lze rozhodnout o přiměřenosti případných sanačních opatření.

Dipl. Ing. Robert Veit-Egerer (PhD Candidate)

VCE – Vienna Consulting Engineers Holding, s. r. o.

Hadikgasse 60, A-1140 Vídeň, Rakousko

tel.: +431 902 921 420, fax.: +431 902 922 420

e-mail: veit-egerer@vce.at; www.vce.at



Ing. Zdeněk Jeřábek, CSc.

e-mail: jerabek@infram.cz

Ing. Miroslav Hubka

e-mail: hubka@infram.cz



oba: Infram, a. s.

Pelušková 1407, 198 00 Praha 9-Kyje

tel.: 281 940 147, fax: 281 940 140, www.infram.cz

První mezinárodní Workshop  
**NAVRHOVÁNÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ PODLE EN 1992-1-1**  
 16. – 17. září 2010  
 Masarykova kolej, Praha

#### Zaměření

Workshop je zaměřen na navrhování betonových konstrukcí dle EN 1992-1-1 (Eurokódu 2). Hlavním cílem je výměna zkušeností získaných při navrhování podle této normy. Budou zde zmíněny podklady, z nichž vychází EN 1992-1-1 a uvedeny hlavní rysy národních příloh členských států. Předpokládá se i uvedení praktických pomůcek pro navrhování.

Workshopu se zúčastní zpracovatelé této normy, přední odborníci evropských univerzit, jakož i zkušení projektanti, kteří pracují v oboru navrhování betonových konstrukcí. Na základě výměny názorů a zkušeností by měly vyplnout náměty na zlepšení normových ustanovení.

Uzávěrka přihlášek se sníženým vložným a rezervace ubytování je **15. července 2010.**

Workshop se koná pod záštitou mezinárodních organizací: **fib** - federation internationale du beton, **CEN** - European Committee for Standardization, **JRC** - Joint Research Centre - European Commission a dále je podporován **ÚNMZ, ČKAIT** a **ČBS ČSSI.**

**CTU PRAGUE**  
 EN 1992-1-1  
 2010



#### Kontakt

České vysoké učení technické v Praze  
 Fakulta stavební  
 Katedra betonových a zděných konstrukcí  
 Thákurova 7, 166 29 Praha  
 Tel.: +420 224 354 633  
 Fax: +420 233 335 797  
 E-mail: [dcs2010@fsv.cvut.cz](mailto:dcs2010@fsv.cvut.cz)

Podrobnější informace o workshopu naleznete na internetových stránkách:

<http://concrete.fsv.cvut.cz/dcs2010>