

PHD WORKSHOP 2024 – MOŽNOSTI ZPŘESNĚNÍ ÚNAVOVÉHO ZATÍŽENÍ ŽELEZNIČNÍCH MOSTŮ A POPIS ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY

Miklas Petr, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
petr.miklas@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Příspěvek v první části popisuje možnosti stanovení přesnějšího a výstižnějšího modelu zatížení na únavu pro posuzování železničních mostů na únavu. Při posuzování betonových konstrukcí často dochází k tomu, že konstrukce při posouzení na únavu nevyhovují. Jednou z příčin je právě využívání velkého zatížení pro tento typ posudku. Jednou z možností je právě stanovení příznivějšího modelu pro únavová posouzení, který lépe bude reflektovat skutečné zatížení mostních konstrukcí. V druhé části se příspěvek zabývá popisem a přeběžným vyhodnocením únavové zatěžovací zkoušky předem předpjatého panelu. Jedná se o zkoušku, během níž byl předpjatý panel vystavován cyklickému zatížení čtyřbodovým ohybem, během kterého po několika stech tisících cyklech došlo k porušení. Zde jsou publikovány pouze předběžné výsledky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Model zatížení na únavu • Únava betonu • Únavová zatěžovací zkouška • Betonové mosty • Železniční mosty

ABSTRACT

In the first part, the paper describes the possibilities of establishing a more accurate and concise fatigue load model for fatigue assessment of railway bridges. When assessing concrete structures, it is often the case that structures fail in fatigue design. One of the reasons for this is the use of large loads for this type of assessment. One possibility is just to establish a more favourable model for fatigue design that better reflects the actual loads on bridge structures. In the second part, the paper deals with the description and re-evaluation of fatigue loading test of prestressed panel. This is a test in which the prestressed panel was subjected to a cyclic four-point bending load during which failure occurred after several hundred thousand cycles. Only preliminary results are published here.

KEYWORDS

Fatigue load model • Fatigue of concrete • Fatigue load test • Concrete bridges • Railway bridges

1. ÚVOD

Vzhledem k obtížnému stanovování skutečné únavové odolnosti betonových konstrukcí je snahou zpřesňovat stávající postupy a popřípadě i tvořit nové metody pro získání přesnějších výsledků únavové odolnosti betonových konstrukcí. Tyto postupy by měly poskytovat reálnější údaje o chování betonových konstrukcí při cyklickém zatěžování. Příspěvek se zabývá popisem vzniku a představením možnosti stanovení únavového zatěžovacího modelu pro železniční mosty ve formě jedné obecné ekvivalentní soupravy. Tento model by mohl tvořit ekvivalent pro model posuzování mostů na únavu u mostů pozemních komunikací, kde lze s výhodou využít modelu zatížení na únavu 3 (FLM3).

V první části příspěvku je představena obecná (reprezentativní) ekvivalentní vlaková souprava, která reflektuje skutečné zatížení mostních konstrukcí především nákladní dopravou. Dále je představena možnost stanovení redukčního součinitele únavového zatížení, kterým je možno redukovat plné zatížení modelem LM 71 na nižší zatížení o stejném rozložení tohoto modelu LM 71 pro využití posouzení konstrukce na únavu. Obě doporučení jsou založena na statistickém vyhodnocení skutečných vlakových souprav pohybujících se na mostech v České republice. Vyhodnocení je založeno na skutečném zatížení a délce jednotlivých vlakových souprav a jejich lokomotiv a vagonů. V rámci zpracování poskytnutých výsledků bylo vyhodnoceno několik tisíc vlakových souprav na celkem šesti mostech v České republice. Na základě obsáhlého vyhodnocení byla stanovena obecná ekvivalentní vlaková souprava, která reprezentuje skutečné zatížení mostních konstrukcí.

Druhá část příspěvku se zabývá popisem a předběžným vyhodnocením únavové zatěžovací zkoušky pomocí Wöhlerových křivek. Metoda přímého využití je v příspěvku popsána především z hlediska konkrétního využití přímo pro provedení experimentu únavové odolnosti betonového předpjatého panelu SPIROLL. V této části

* Školitel: doc. Ing. Iva Broukalová, Ph.D.

příspěvku je popsán návrh a posouzení tohoto panelu včetně posouzení únavové odolnosti a výpočtu předpokládaného počtu cyklů do porušení. Dále zde je popsán předpokládaný postup průběhu experimentu včetně vypočtených vnitřních sil a napětí, které se v panelu vyskytovali.

2. NÁVRH OBECNÉ EKVIVALENTNÍ VLAKOVÉ SOUPRAVY

První část příspěvku se zabývá popisem a představením obecné ekvivalentní vlakové soupravy, která může být následně využita pro únavové posouzení mostních konstrukcí.

Návrh obecné ekvivalentní vlakové soupravy byl proveden na základě vyhodnocení velkého množství dat poskytnutých Správou železnic, s.o. [5] Jedná se data o skutečných vlakových soupravách vyskytujících se na železniční síti České republiky. Data byla vždy měřena během jednoho měsíce pro všechny vlakové soupravy. U všech mostů se dle informací správce jedná o reprezentativní zatížení dané mostní konstrukce. Celkem byla zatížení vlakovými soupravami měřena na šesti mostech s traťovou třídou D4. Jedná se o následující mosty:

- Most přes ulici Chodovská v Praze
- Most v Ostravě – kolej číslo 1
- Most v Ostravě – kolej číslo 2
- Most v Přerově
- Most přes Rokytka v Praze – kolej číslo 1
- Most přes Rokytka v Praze – kolej číslo 2

Dále byla data poskytnuta ještě pro jeden mostní objekt u Leskovic v okrese Pelhřimov. Data z tohoto mostu nebyla do stanovování obecné ekvivalentní vlakové soupravy zahrnována z důvodu zcela odlišné traťové třídy trati, kterou most převádí. Data by zahrnutím výsledků i z této mostní konstrukce byla značně ovlivněna.

2.1. Popis měřených mostních konstrukcí

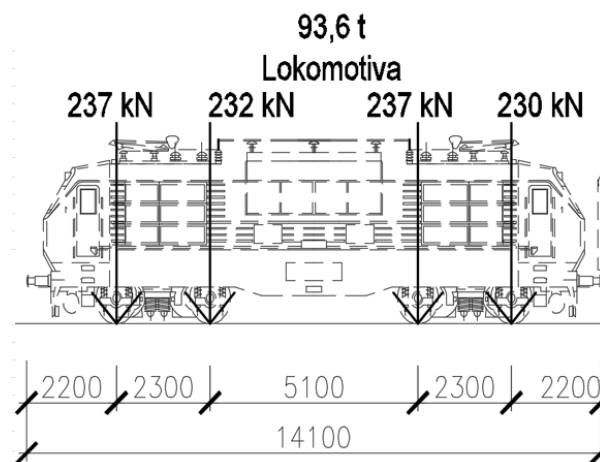
Měření probíhalo na betonových mostních konstrukcích. Všechny konstrukce jsou realizovány jako prostá pole (i konstrukce o více polích). Jedná se o stávající mostní konstrukce z období realizace mezi lety 1960-1980. Všechny tyto mostní konstrukce jsou realizovány jako podélné prefabrikované mostníky (např. KA-73, KDP 15, KT, I atd.). Prefabrikáty jsou na mostech celkem buď dva nebo čtyři v závislosti na šířkovém uspořádání každé mostní konstrukce. Rozpětí mostů se pohybuje v rozmezí 14,8 m – 33,0 m. [6]

2.2. Princip návrhu zatěžovacího modelu obecné ekvivalentní vlakové soupravy FLM71

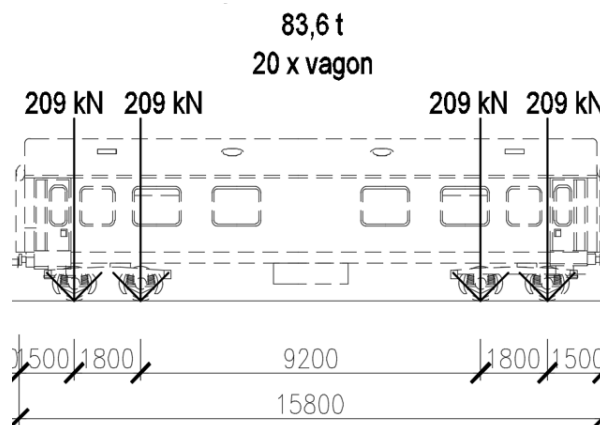
U měřených vlakových souprav bylo zaznamenáváno rozložení vlakové soupravy, tzn. počet lokomotiv a vagonů, vzdálenosti mezi jednotlivými nápravami a dvojkolími a zatížení každé nápravy. Ze změřených průjezdů všech vlakových souprav, jejich rozložení a zatížení, kterých bylo u každé mostní konstrukce během jednoho měsíce přibližně 500 – 800 bylo snahou pro každou tuto mostní

konstrukci stanovit její reprezentativní vlakovou soupravu a z těchto reprezentativních vlakových souprav byla v závěru stanovena jedna obecná reprezentativní vlaková souprava FML71 odpovídající traťové třídě D4.

Návrh jednotlivých ekvivalentních vlakových souprav byl proveden pro charakteristickou kombinaci, a tedy pro 95 % kvantil pomocí statistických metod. [4] Tímto způsobem byla stanovena každá veličina vlakové soupravy, tzn. počet vagonů, rozpojení dvojkolí a náprav a především zatížení na jednotlivé nápravy. Následně byla z jednotlivých ekvivalentních vlakových souprav vytvořena jedna obecná ekvivalentní vlaková souprava. Lokomotiva obecné ekvivalentní metody je zobrazena na obr. 1 a jeden reprezentativní vagon je zobrazen na obr. 2.



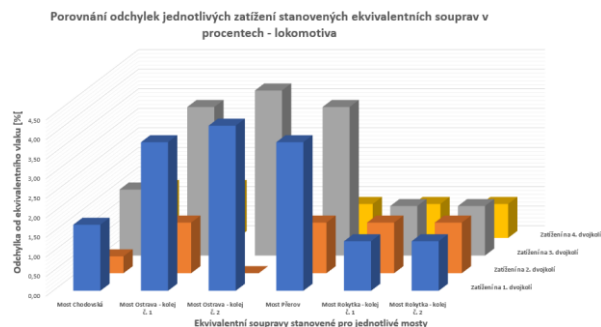
Obrázek 1: Navržená lokomotiva pro ekvivalentní vlakovou soupravu



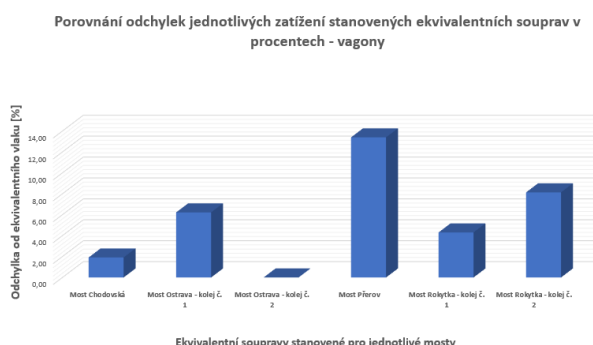
Obrázek 2: Jeden reprezentativní vagon ekvivalentní vlakové soupravy

Z obr. 1 a obr. 2 je vidět, že navržená ekvivalentní vlaková souprava má jednu lokomotivu a 20 vagonů. Zatížení i vzdálenosti jako určovány bezpečně pro 95 % kvantil, který odpovídá charakteristické kombinaci zatížení. Pro verifikaci navrženého řešení modelu zatížení obecné ekvivalentní soupravy FLM71 byly výsledky navržené soupravy ověřeny s jednotlivými reprezentativními soupravami jednotlivých mostů. Ověření bylo provedeno jak pro vzdálenosti, tak pro zatížení na nápravy. Na obr. 3 a obr. 4 jsou znázorněny

v grafech odchylky navržené obecné ekvivalentní vlakové soupravy od jednotlivých reprezentativních souprav jednotlivých mostů. Odchylky jsou znázorněny v procentech.



Obrázek 3: Porovnání odchylek zatížení lokotiv ekvivalentních souprav mostů s lokomotivou dle obecné ekvivalentní soupravy [%]



Obrázek 4: Porovnání odchylek zatížení lokotiv ekvivalentních souprav mostů s lokomotivou dle obecné ekvivalentní soupravy [%]

Z grafů je patrné, že maximální odchylka zatížení náprav u jednotlivých ekvivalentních souprav mostů od navržené obecné ekvivalentní vlakové soupravy se u lokomotivy pohybuje v rozmezí 0 – 4,5 % a u vagonů se odchylka pohybuje v rozmezí 0 – 12,2 %. Model zatížení na únavu FLM71 pro železniční mosty tímto tvoří ekvivalent k modelu zatížení na únavu FLM3 pro posuzování mostů pozemních komunikací na únavu. Z uvedených výsledků výzkumu je patrné, že odchylka není vysoká a je možné navržený model zatížení FLM71 pro únavové posouzení železničních mostních konstrukcí s výhodou využít.

2.3. Využití modelu zatížení FLM71

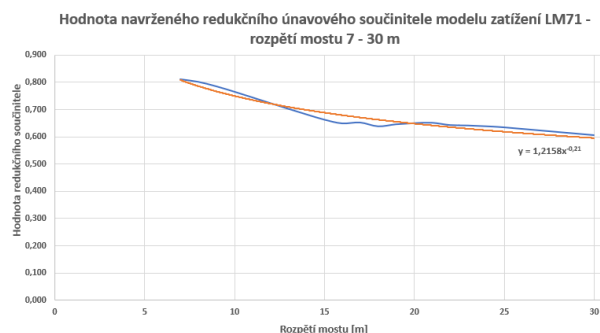
Předpoklad využití modelu zatížení na únavu FLM71 pro posuzování železničních mostů na únavu se předpokládá například při využití zjednodušených metod místo dosud využívané časté kombinace statického zatížení. Hlavní využití navrženého modelu FLM71 se předpokládá u metod využívajících ekvivalentního rozkmitu napětí, kde u některých posouzení buď není jasné, jaké zatížení se má využívat nebo se využívá statického modelu LM71, který se jeví jako zbytečně přísný pro posuzování únavy betonu. Obecně lze model využít i pro posouzení pomocí Palmgren-Minerova pravidla. Výhodou modelu FLM71 je především významná redukce pracnosti stanovení únavových účinků od zatížení např. při využití ekvivalentních metod a

stanovování ekvivalentního zatížení nebo využívání kombinace vlakových souprav dle přílohy D ČSN EN 1991-2.

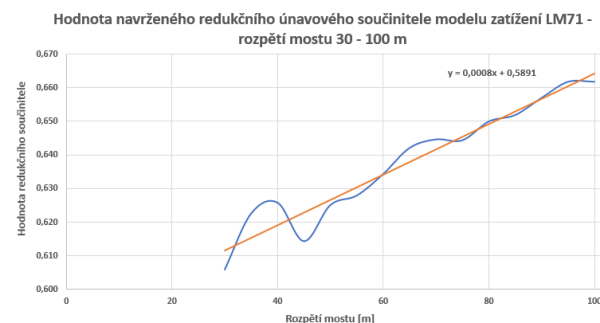
3. VYUŽITÍ REDUKČNÍHO SOUČiniteLE ÚNAVOVÉHO ZATÍŽENÍ

Redukční součinitel je obdobně jako model zatížení FLM71 uvedený v kap. 2.2 stanoven na základě měření průjezdu vlakových souprav na mostních konstrukcích uvedených v kap. 2. Snahou pro stanovení redukčního součinitele únavového zatížení „ β “ je získání hodnoty redukčního součinitele, která odpovídá poměru únavového a statického zatížení od modelu zatížení LM71. [7] Redukční součinitel pak bude možné stanovit pouze v závislosti na rozpětí mostní konstrukce a bude jím možné přenásobit v případě staticky neurčitých konstrukcí hodnoty zatížení statického modelu LM 71 a v případě staticky určitých konstrukcí by jím bylo možné přenásobit rovnou účinky zatížení. Opět je tedy navržená úprava výpočtu únavového zatížení výrazně méně pracnější než dosud využívané postupy. [4]

Postup je stanoven pro rozpětí mostních konstrukcí 7 - 100 m. Redukční součinitel se pohybuje v rozmezí hodnot 0,6 – 0,8. Průběh vývoje redukčního součinitele je znázorněn v grafech na obr. 5 a obr. 6.



Obrázek 5: Vývoj redukčního součinitele únavového zatížení pro rozpětí mostu 7 – 30 m [-]



Obrázek 6: Vývoj redukčního součinitele únavového zatížení pro rozpětí mostu 30 – 100 m [-]

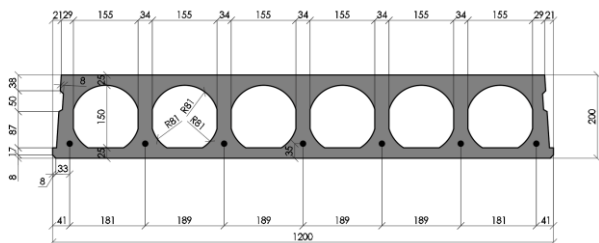
Z grafů na ob. 5 a obr. 6 je vidět, že maximální hodnoty redukční součinitele únavového zatížení dosahuje pro rozpětí mostní konstrukce 7 m. Modrou čarou je v grafech skutečný stanovený průběh redukčního součinitele únavového zatížení. Oranžovou čarou je pak grafem proložena regresní křivka.

4. NÁVRH A PŘEVEDENÍ ÚNAVOVÉ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY PRO OVĚŘENÍ METODY PŘÍMÉHO VYUŽITÍ WÖHLEROVÝCH KŘIVEK

4.1. Návrh únavové zatěžovací zkoušky

Poslední kapitola příspěvku se věnuje popisu návrhu a provedení únavové zatěžovací zkoušky. Experiment byl prováděn z důvodu ověření možnosti použití metody přímého využití Wöhlerových křivek na základě experimentálních dat [1,3]. Návrh zatěžování a počtu cyklů do porušení byl proveden právě touto metodou tak, aby došlo k porušení panelu cyklickým zatěžováním.

Zkouška byla provedena na předem předpjatém panelu SPIROLL šířky 1200 mm poskytnutém Prefou Praha, a.s. [9] Panel je výšky 200 mm předepnutý 7 lany průměru 12,5 mm při dolním povrchu. Jedná se o dutý panel, jehož čela byla do vzdálenosti 1 m od okrajů zabetonována kvůli vzniku velkých posouvajících sil. Rozpětí panelu je 3,5 m. Příčný řez panelem je zobrazen na obr. 7.



Obrázek 7: Příčný řez panelem SPIROLL v místě s dutinami

Pro panel byl proveden statický výpočet, kterým byl následně navržen postup zatěžování předpjatého panelu během cyklického zatěžování. Výpočet byl proveden tak, aby došlo k porušení únavovým zatěžováním panelu. Panel byl zkoušen na únavu čtyřbodovým ohybem, což je patrné z fotografie na obr. 8.

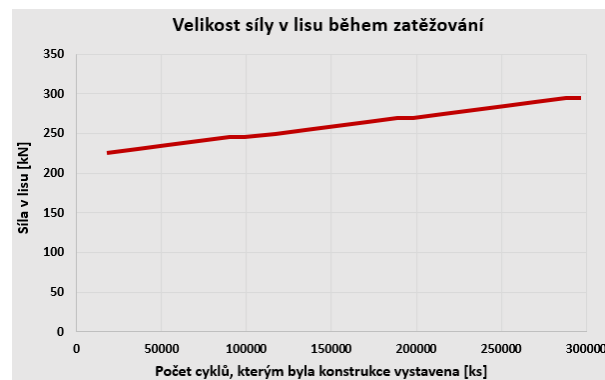


Obrázek 8: Fotografie zkoušeného panelu v lisu před začátkem zatěžování [8]

Před započítáním zkoušky bylo na panel osazeno celkem deset tenzometrů měřících poměrné přetvoření betonu.

4.2. Předběžné vyhodnocení únavové zatěžovací zkoušky

Panel byl zkoušen v průběhu jednoho týdne na přelomu listopadu a prosince roku 2023. Frekvence zatěžování panelu byla na začátku 5 Hz a v průběhu zatěžování vzhledem ke vzrůstajícím průhybům byla snížena na 3 Hz a následně na 2 Hz až do kolapsu konstrukce. Zatěžovací síla v lisu v počátku byla stanovena na hodnotu 225 kN se vzrůstající tendencí. Výpočtem s použitím přímého využití Wöhlerových křivek bylo předpokládáno porušení konstrukce při dosažení síly v lisu přibližně v hodnotě 313 kN. Vývoj síly v lisu je patrný z grafu na obr. 9 až do dosažení únavové odolnosti betonu a kolapsu konstrukce.



Obrázek 9: Vývoj síly v lisu během zatěžování panelu cyklickým zatížením až do dosažení únavové odolnosti betonu

Zatížení v lisu vzrůstalo během zatěžování každých 18000 cyklů (respektive 9000 cyklů jednou za 6 bloků) o 5 kN až do kolapsu konstrukce, ke kterému došlo při hodnotě síly v lisu 292 kN. Lze tedy říci, že dosažený výsledek zkoušky odpovídá výpočtu s chybou přibližně 7 %. Další vyhodnocení této zkoušky budou předmětem dalšího výzkumu. Skutečnost, že došlo k porušení panelu o něco dříve než bylo stanoveno výpočtem lze přisuzovat dodatečnému zabetonování dutin panelu.

První trhliny při cyklickém zatěžování vznikly v podélním směru u horního povrchu v blízkosti podpor v místě dodatečně vybetonovaných dutin při hodnotě 108000 cyklů a zatížení v lisu 250 kN. Fotografie první trhliny je zobrazena na obr. 10.



Obrázek 10: Vznik první trhliny během zatěžování panelu při 108000 cyklech a síle v lisu 250 kN

Porušení celého panelu, při kterém byla ukončena únavová zatěžovací zkouška, je zobrazeno na obr. 11.



Obrázek 11: Fotografie při kolapsu nasníku a ukončení únavové zatěžovací zkoušky[8]

5. ZÁVĚR

Příspěvek v první části nabízí dvě možnosti stanovení (redukce) únavového zatížení.

První možností je využití obecné ekvivalentní vlakové soupravy, která byla stanovena a verifikována pro několik mostních konstrukcí, na nichž byla měřena data průjezdů všech vlakových souprav během jednoho měsíce. Tato data tvoří reprezentativní složku zatížení každého z daných mostů. Jedná se o model zatížení na únavu FLM71, který je možné využít pro stanovování ekvivalentních únavových účinků zatížení na posuzované konstrukce.

Druhou možností je využití redukčního součinitele únavového zatížení „ β^* “, kterým je možné přenásobit zatížení od plného statického modelu LM71 (účinky zatížení tohoto modelu u staticky určitých konstrukcí).

Výhodou obou metod je velmi snížená pracnost získání odpovídajících účinků zatížení na mostní konstrukce pro posouzení těchto konstrukcí na únavu.

Druhá část příspěvku se zabývá popisem návrhu a předběžným vyhodnocením provedené únavové zatěžovací zkoušky betonového předpjatého panelu SPIROLL. Důvodem pro provedení zkoušky je ověření použití metody přímého využití Wöhlerových křivek na základě množství získaných experimentálně stanovených dat od dalších autorů zabývajících se chováním betonu při cyklickém zatěžování. Zkouška proběhla úspěšně až do kolapsu konstrukce. Ke kolapsu konstrukce došlo při hodnotě zatížení v lisu 292 kN. Vypočtená předpokládaná hodnota kolapsu konstrukce byla stanovena na hodnotu v lisu přibližně 313 kN, tzn. rozdíl je přibližně 7 %.

PODĚKOVÁNÍ

Práce vznikla za podpory SGS 2023 a i nadále pokračuje. Dále je poděkování věnováno doc. Ing. Ivě Broukalové, Ph.D., doc. Ing. Marku Foglarovi, Ph.D. a doc.

Ing. Romanu Šafářovi, Ph.D. za jejich odborné vedení a užitečné rady při zpracování této práce.

Reference

- [1] Hansen, M. *Determination and assessment of fatigue stresses on concrete bridges*, *Structural Concrete*, 21(4), 2020, pp. 1286–1297. doi: 10.1002/suco.201900432
- [2] MIKLAS, P. *Zpřesnění pro úpravu stávajících postupů posuzování betonu na únavu*, pp 106-110 ISSN 1805-0638
- [3] PAYMAN, A., SZYMANSKI, M. *Fatigue in Plain Concrete*, Göteborg, 2006
- [4] MIKLAS, P. *Recommendations for modifying concrete fatigue assessments*. *Young Engineers Colloquium Dresden 2023, IABSE Colloquium, 2023*, pp 14-15 ISBN 978-3-85748-193-2.
- [5] Správa železnic, s.o., *Podklady přejezdů jednotlivých vlakových souprav přes měřené mosty*
- [6] Správa železnice, s.o., *Archivní dokumentace měřených mostů*
- [7] ČSN EN 1991-2 *Eurokód 1: Zatížení mostů dopravou*
- [8] SVÚM, a.s., *Výzkumné a testovací centrum materiálů*
- [9] Prefa Praha, a.s., *Prefabrikovaný předpjatý panel PSP200*