

OVĚŘENÍ HODNOT ODPORŮ KOLEJOVÉHO LOŽE NA ZÁKLADĚ VYHODNOCENÍ MONITORINGU BEZSTYKOVÉ KOLEJE

Matyáš Kuba, *

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

ABSTRAKT

Hlavním cílem této práce byla podrobná analýza chování bezстыkové koleje na vybraných mostních objektech. Zkoumané mosty se nacházejí na železničních tratích TÚ 1701 Česká Velenice (mimo) – Benešov u Prahy (mimo) a 2401 Hohenau (ÖBB) (včetně) – Přerov (mimo). Veškerá data použita k analýze byla získána z dlouhodobého monitoringu. V rámci zpracování byly vybrány konkrétní dny, pro které byl stanoven podélný odpor nezátížená koleje. Pro každý analyzovaný most byl vytvořen model popisující interakci mezi bezстыkovou kolejí a mostní konstrukcí. Ne-dílnou součástí práce bylo také určení efektivního součinitele teplotní roztažnosti koleje pro jednotlivé dny. Výsledky této analýzy mohou přispět k optimalizaci návrhu mostních objektů a zajištění jejich spolehlivého fungování v kombinaci s bezстыkovou kolejí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Podélný odpor koleje, bezстыková kolej, monitoring, analýza, kolejové lože, interakce

ABSTRACT

The main objective of this thesis was a detailed analysis of the behavior of continuously welded rail (CWR) on selected bridge structures. The studied bridges are located on railway lines TÚ 1701 Česká Velenice (excluding) – Benešov u Prahy (excluding) and 2401 Hohenau (ÖBB, including) – Přerov (excluding). All data used for the analysis were obtained through long-term monitoring. Specific days were selected for evaluation, during which the longitudinal resistance of the unloaded rail was determined. For each analyzed bridge, a model was created to represent the interaction between the CWR and the bridge structure. An essential part of the thesis was also the determination of the effective coefficient of thermal expansion for the evaluated days. The results can help optimize bridge design and ensure reliable performance in combination with CWR.

KEYWORDS

Longitudinal rail resistance, continuous welded rail, monitoring, analysis, track bed, interaction

1. ÚVOD

Hlavním cílem výzkumu byla analýza a vyhodnocení experimentálního monitoringu bezстыkové koleje na níže uvedených mostních konstrukcích. Z provedeného měření budou získané hodnoty podélného odporu, které budou následně porovnány s normovými hodnotami stanovenými příslušnými normami a formulovány závěry, které z těchto porovnání vyplynou. Tyto závěry mohou přispět k hlubšímu pochopení mechaniky interakce mezi kolejovým svrškem a mostními konstrukcemi.

2. INTERAKCE BEZSTYKOVÉ KOLEJE A MOSTU

V úvodu je nezbytné se zaměřit na problematiku interakce koleje a mostu, která tvoří klíčovou část teoretického základu. Mezi základní parametry, které ovlivňují chování bezстыkové koleje, patří zejména konstrukce samotné koleje, typ a tuhost uložení kolejnic na pražce, stejně jako vodorovná a svislá tuhost kolejového lože. Tyto parametry hrají zásadní roli při přenosu sil a zajištění stability koleje, což je obzvláště důležité pro ty mostní konstrukce, kde mohou vznikat specifické podmínky interakce.

2.1. Vodorovné účinky na most od teplotního zatížení

2.1. Vodorovné účinky na most od teplotního zatížení

Při převádění bezстыkové koleje přes most vznikají v důsledku teplotních změn v koleji a nosné konstrukci vodorovné podélné síly, které působí na mostní konstrukci, ložiska, pilíře a opěry. Pokud je kolej vedena v oblouku, bezстыková kolej navíc přenáší do konstrukce vodorovné příčné zatížení. [6]

Rozdíl změn teploty mostní konstrukce a koleje vyvolává vzájemné působení mezi mostem a kolejí, které závisí na tuhosti jejich uložení. Tuhost uložení koleje se odvíjí od způsobu uložení – přímé uložení, uložení s kolejovým ložem nebo s mostnicí.

Vliv teploty je rovněž závislý na materiálu nosné konstrukce. Ocelové mosty obvykle vykazují větší teplotní změny než sražené nebo betonové mosty. [2]

Pro bezстыkovou kolej jsou klíčové změny teploty od okamžiku její instalace na mostě. Maximální a minimální možné teploty v dané lokalitě se určují na základě teplotních map podle normy ČSN EN 1991-1-5. [7]

* Školitel: doc. Ing. Marek Foglar, Ph.D.

2.2. Posouzení interakce bezстыkové koleje a mostu

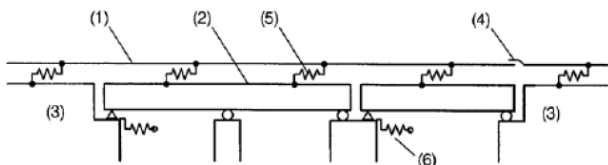
Pro posouzení interakce bezстыkové koleje a mostu lze použít dvě možnosti. Posouzení kombinované odezvy pro interakci mostu a BK se provádí dle ČSN EN 1991-2. [3] a její alternativou Metoda kompletní analýzy uvedenou v MVL 150 [2].

Posouzení interakce koleje a mostu lze zjednodušit na ověření napjatosti v kolejnici, tedy na ověření, že přírůstek napětí v kolejnici od interakce s nosnou konstrukcí nepřesahuje mezní přípustné hodnoty. Tedy ověření, zda při překonávání mostní konstrukce nedojde k porušení koleje.

Pokud posouzení dle ČSN EN 1991-2 nevyhoví lze využít posouzení dle metody komplexní analýzy. Možnost použití alternativní metod je uvedeno v Z4 ČSN EN 1991-2 čl. NA.2.76 Článek 6.5.4.5 Návrhová kritéria.

Základním principem je posouzení celkového napětí na úrovni mostní konstrukce stejně jako při posouzení kolejnice v běžné trati dle předpisu SŽDC S3, nikoliv jen přírůstku napětí od proměnného zatížení. Kompletní analýzou lze řešit prakticky jakékoliv mostní konstrukce a koleje na mostě. [2]

2.3. Model interakce kolej-most

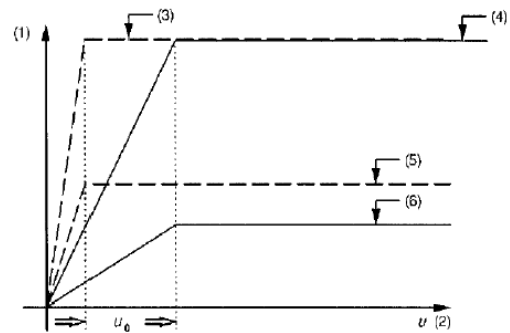


Obrázek 1 - Interakce kolej – most [2]

- (1) Kolej
- (2) Nosná konstrukce
- (3) Tělo železničního spodku
- (4) Kolejové dilatační zařízení
- (5) Podélné nelineární pružiny vyjadřující průběh závislosti podélné zatížení/posunutí koleje
- (6) Podélné pružiny vyjadřující podélnou tuhost k pevnému uložení nosné konstrukce s uvážením tuhosti základů, pilířů a ložisek.

2.4. Podélný odpor koleje

Podélný odpor dle [2] brání podélným pohybům a změnám délky koleje od zatížení změnou teploty. Podélný odpor je složen ze dvou částí, první z nich je odpor kolejnicových upevňovačů a druhý je vliv kolejového roštu v kolejovém loži. Na odpor má vliv hmotnosti a tuhost kolejového roštu, stav a typ kolejového lože, svislé přitížení. Velikost podélného odporu se v normě ČSN EN 1991-2 [3] uvádí podle obrázku:



Obrázek 2 - Podélné odpory v koleji dle zatížení [3]

- (1) podélný odpor v koleji na jednotku délky
- (2) posunutí kolejnice vzhledem k hornímu povrchu podporující nosné konstrukce
- (3) podélný odpor koleje (zatížená kolej) – 60 kN/m
- (4) podélný odpor koleje v kolejovém loži (zatížená kolej) – 60 kN/m
- (5) podélný odpor koleje (nezatížená kolej) – 30 kN/m
- (6) podélný odpor koleje v kolejovém loži (nezatížená kolej) – 20 kN/m

3. MONITORING KONSTRUKCÍ

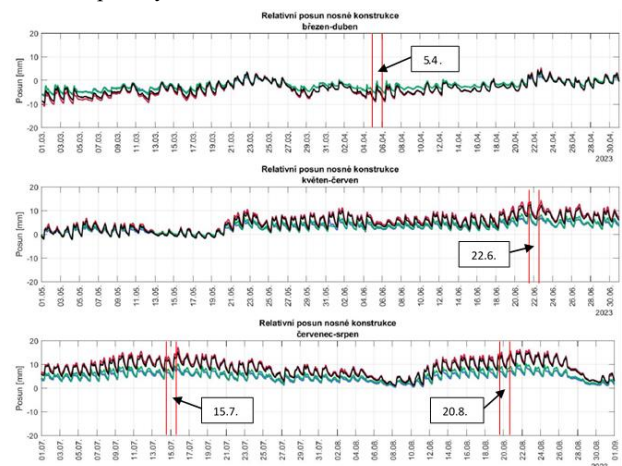
Monitorovací sestavy byly navrženy a instalovány skupinou pod vedením prof. Ing. Pavla Ryjáčka, Ph.D.

Jednotlivé sestavy se skládají ze snímačů teploty, tenzometrů, potenciometrických snímačů dráhy a měřicích ústředí.

Naměřené hodnoty ze snímačů zpracovává měřicí ústředna, která je ukládá do paměti, odkud jsou následně připraveny k další analýze.

3.1. Zpracování dat

Naměřené výsledky byly zpracovány do přehledných grafických reprezentací, které umožnily identifikaci dne s nejvýraznějšími změnami teploty nosné konstrukce. Mezi zobrazenými grafy se jako nejvhodnější pro výběr dnů ukázal graf zachycující relativní posuny nosné konstrukce.



Obrázek 3 - Relativní posuny nosné konstrukce Soběšlav

* Školitel: doc. Ing. Marek Foglar, Ph.D.

Data z těchto dní byla pro usnadnění analýzy převedena do Excelové tabulky, kde byly hodnoty zjednodušeny pro další zpracování. Naměřené hodnoty z levého a pravého nosníku byly sloučeny do jediné průměrné hodnoty, což se rovněž týkalo kolejí. Tento postup usnadnil porovnání a analýzu posunů nosné konstrukce, čímž se zvýšila přehlednost a efektivita následného zpracování dat

4. VÝPOČETNÍ MODEL

Numerický model byl vytvořen v programu MIDAS Civil 2024. Na model bylo aplikováno obdobné zatížení, jaké bylo naměřeno v rámci monitoringu, a následně bylo toto zatížení vyhodnoceno.

Model byl vytvořen na základě projektové dokumentace. Díky symetrii konstrukce bylo možné konstrukci zjednodušit a modelovat ji jako prutovou, s využitím náhradních průřezů. Dvojice ocelových nosníků byla nahrazena jedním nosníkem, jehož průřezové charakteristiky odpovídají charakteristikám původní dvojice nosníků. Betonová sprážená deska, která má podle projektové dokumentace proměnný průřez po své šířce, byla zjednodušena vytvořením náhradní desky s konstantní tloušťkou, odpovídající ekvivalentním průřezovým charakteristikám. Dvě dvojice kolejnic byly nahrazeny jednou čtveřicí.

V souladu s normou ČSN EN 1991-2 [3] je nutné před a za mostem modelovat kolej odpovídající koleji na širé trati, a to s minimální délkou 150 m.

V modelu byly vytvořeny skupiny, které zjednodušují ovládnání modelu a umožňují práci s fázemi výstavby. V programu jsou tyto skupiny rozděleny podle jejich vlastností. Byly použity tři typy skupin, které jsou popsány níže.

První skupina, nazvaná Structure Group, se zaměřuje na konstrukční prvky. Tato skupina usnadňuje rychlé zobrazení, výběr a označování jednotlivých konstrukčních prvků. Druhá skupina je použita k ovládnání podepření a vazeb obsažených v modelu. Jedná se o skupinu Boundary Group. Třetí skupina definuje zatížení nazvaná Load Group.

4.1. Nosná konstrukce

Jak bylo výše zmíněno, nosná konstrukce je složena ze dvou ocelových nosníků se spráženou železobetonovou deskou. Vzhledem k symetrii konstrukce, bylo možné dva nosníky nahradit jedním, který odpovídá svými průřezovými charakteristikami charakteristikám dvojice nosníků.

Průřezy nosné konstrukce byly tedy vymodelovány jako sprážený průřez ocelového I-profilu a betonové desky.

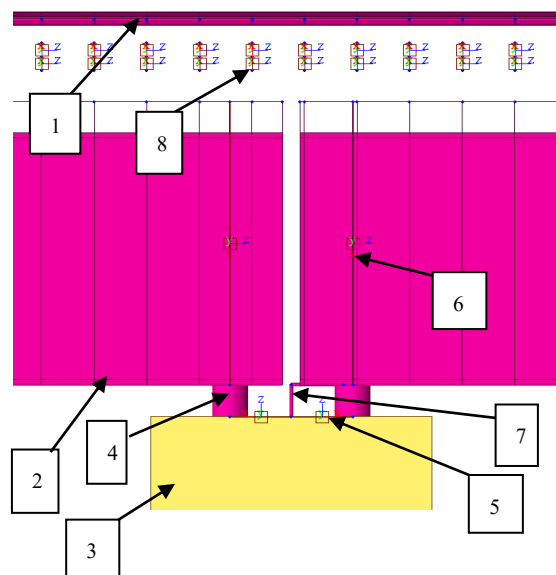
4.2. Spodní stavba

Spodní stavba skutečného mostu byla zjednodušena a podobně jako nosná konstrukce nahrazena ekvivalentním průřezem, který svým tvarem odpovídá průřezovým charakteristikám dvojice pilířů.

4.3. Sestavení modelu

Model byl sestaven s návazností na již zmíněné fakt. Vzorový model je zobrazen a popsán na obrázku níže

- 1 - Kolejnice UIC60
- 2 - Nosná konstrukce
- 3 - Spodní stavba
- 4 - Ložisko
- 5 - Tuhá vazba mezi spodní stavbou a ložisky
- 6 - Tuhá vazba mezi nosnou konstrukcí a ložisky
- 7 - Prvek pro sledování relativních posunů nosné konstrukce
- 8 - Vazby definující kolejové lože

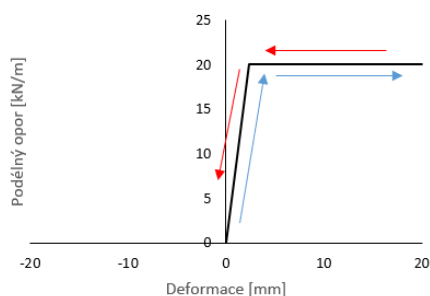


Obrázek 4 - Sestavení modelu

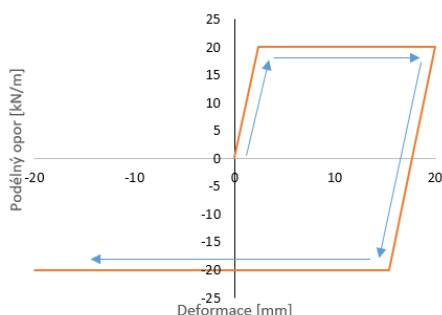
4.4. Modelování interakce kolej-most

Z výše uvedené problematiky bezстыkové koleje a její interakce s mostní konstrukcí, bylo nutné nastavit odpovídající charakteristiky kolejového lože. z normy vychází, že funkce pro podélný odpor se chovají symetricky, to znamená, že při posunu kolejového lože tam i zpět nabývá stejných vlastností.

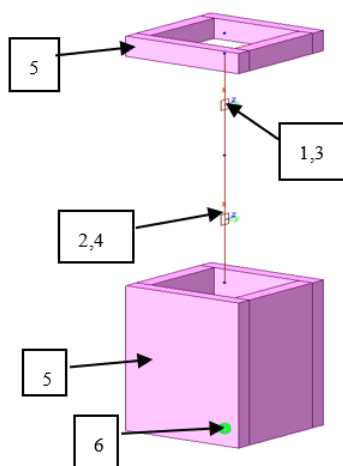
Program MIDAS Civil již v základní verzi obsahuje modul pro výpočet interakce kolej–most. Ovšem tento modul obsahuje chybu spočívající v nastavení „zpětného“ chodu kolejového lože. V programu je předpokládáno, že při odlehčení konstrukce se tuhost vrací po stejné křivce zpět, což však neodpovídá realitě. Je proto nutné definovat jiný způsob propojení koleje a mostu.



Obrázek 5 - Chování MIDAS funkce



Obrázek 6 - Požadované chování



Obrázek 7 - Sestavení podepření koleje

- 1 - Vazba s volným pohybem ve směru Dx
- 2 - Vazba s volným pohybem ve směru Dz
- 3 - Vazba pro svislý odpor kolejového lože most/trat'
- 4 - Vazba pro podélný odpor kolejového lože nezátíženě koleje
- 5 - Pomocný prvek pro tuhou vazbu
- 6 - Podpora kolejového lože kolejový spodek/mostní konstrukce

5. VYHODNOCENÍ DAT

Pro hodnocení dat byl vytvořen excelový soubor, který na základě definovaných podmínek porovnává hodnoty z monitoringu konstrukce s hodnotami z výpočetního modelu.

Prvním krokem bylo vybrat z naměřených hodnot monitoringu takové intervaly, kde všechny hodnoty spolu korespondují, tedy hodnoty, u kterých lze s jistotou tvrdit, že jsou správné a mohou být použity v dalších krocích.

Intervaly byly voleny tak, aby byl co největší teplotní rozdíl mezi počátečním a konečným časem intervalu.

Z připravených dat, vytvořených podle výše uvedených postupů, byla následně sestavena vstupní data pro další výpočty v programu MIDAS Civil. Jednotlivé intervaly byly vloženy do tabulky jako počáteční a koncový čas. Na základě těchto dvou časů a názvů snímačů teploty byly vypočítány rozdílové hodnoty teploty v měřených bodech konstrukce a kolejnice.

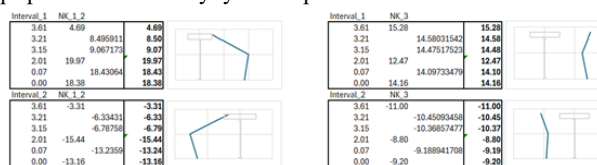
Rozdílové hodnoty teploty byly získány jako rozdíl mezi teplotou v čase koncového intervalu a teplotou v čase počátečního intervalu.

SKUPINA	ČAS		ΔT [°C] NK					
			Mean(ST1, ST2) [°C]	Mean(ST3, ST4) [°C]	Mean(ST5, ST6) [°C]	Mean(ST11, ST12) [°C]	Mean(ST13, ST14) [°C]	Mean(ST15, ST16) [°C]
	Souřadnice Z [m]		0,00	2,01	3,61	0,00	2,01	3,61
Interval_1	15.07.2023 3:45	15.07.2023 17:45	18,38	19,97	4,69	14,16	12,47	15,28
Interval_2	15.07.2023 18:00	16.07.2023 7:00	-13,16	-15,44	-3,31	-9,20	-8,80	-11,00

SKUPINA	ČAS		ΔT [°C] B										PRŮMĚR
			Mean(STK1, P, D) [°C]	Mean(STK2, P, D) [°C]	Mean(STK3, P, D) [°C]	Mean(STK4, P, D) [°C]	Mean(STK5, P, D) [°C]	Mean(STK6, P, D) [°C]	Mean(STK7, P, D) [°C]	Mean(STK8, P, D) [°C]	Mean(STK9, P, D) [°C]	Mean(STK10, P, D) [°C]	
	Souřadnice Z [m]		35,68	36,90	36,54	36,76	37,26	36,90	35,33	36,18	36,55	36,55	
Interval_1	15.07.2023 3:45	15.07.2023 17:45	26,98	28,28	27,69	28,18	28,36	28,80	28,27	27,09	26,80	27,83	
Interval_2	15.07.2023 18:00	16.07.2023 7:00	-26,98	-28,28	-27,69	-28,18	-28,36	-28,80	-28,27	-27,09	-26,80	-27,83	

Obrázek 8 - Teploty v jednotlivých snímačích odpovídající intervalům Soběslav

Výsledné hodnoty teploty byly získány pouze ve třech bodech nosné konstrukce. Pro přesné zadání teplotních změn nosníku bylo nutné dopočítat teploty i v dalších bodech. Nosná konstrukce byla v příčném řezu rozdělena na šest významných bodů, tedy na místa, kde dochází ke změně průřezu. Tato data byla dopočtena pomocí lineární interpolace mezi body. Všechny hodnoty byly následně vloženy do grafu pro lepší orientaci a pro případné nalezení chyby v interpolaci.



Obrázek 9 - Vstupní hodnoty teplotního zatížení

Hodnoty změn teploty jednotlivých intervalů byly vloženy do výpočetního programu a následně byl proveden výpočet modelu s těmito daty.

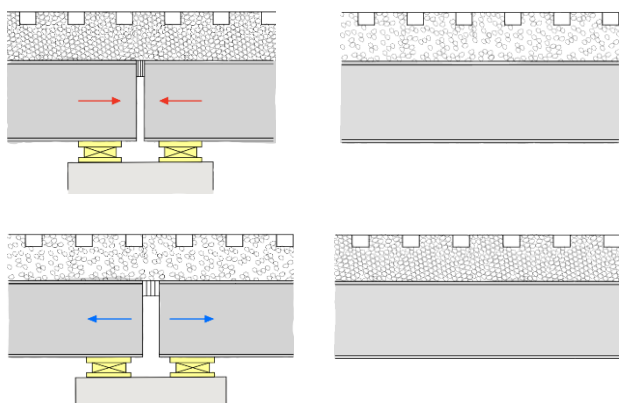
Pro porovnání dat byla vytvořena logická tabulka, která se automaticky doplňuje na základě zvoleného zatížení. Pro zrychlení práce jsou jednotlivé zatěžovací stavy uvedeny v rolovacím seznamu. Jelikož tenzometry jsou umístěny na stejném prvku,

byla čísla prvků doplněna ručně. Následně byla pomocí funkce doplněna jejich čísla uzlů. Díky těmto datům se zbytek tabulky automaticky doplní a zobrazí data z monitoringu i výsledky z výpočetního modelu pro konkrétní interval.

5.1. Problematiky dilatačních celků

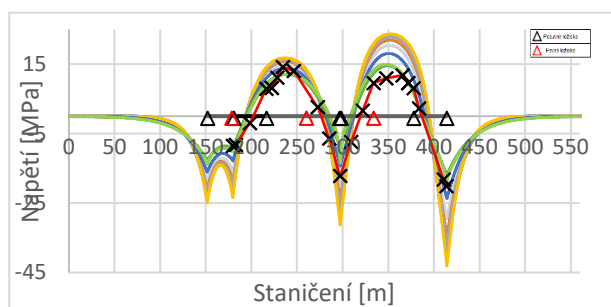
Ze zpracovaných dat bylo odhaleno abnormální chování konstrukce nad pilířem P4. Na tomto pilíři jsou uloženy dvě konstrukce na protichůdných podélně posuvných ložisech. z tohoto důvodu se konce nosných konstrukcí na tomto pilíři pohybují současně, což vytváří abnormální podmínky pro kolejové lože.

Při zvýšení teploty, tedy při oteplení, se konstrukce protahují směrem k sobě, čímž tlačí na kolejové lože, které dosahuje výrazně vyšších hodnot podélného odporu. Naopak při snížení teploty, tedy při ochlazení, se konstrukce pohybují směrem od sebe, což způsobuje řídnutí kolejového lože a snižování podélného odporu.



Obrázek 10 - Změna kolejového lože při ohřátí a ochlazení u mostního závěru a v poli

5.2. Vyhodnocení dat

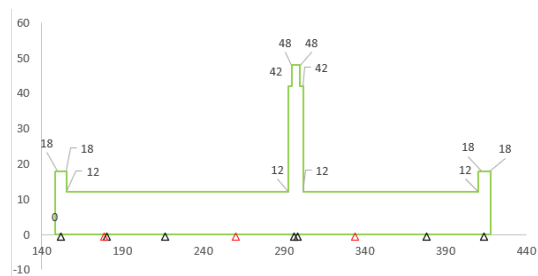


Obrázek 11 - Průběh normálových napětí pro Interval 1

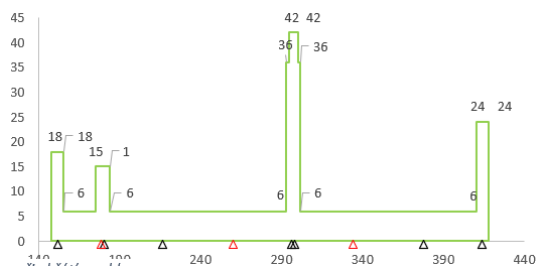
Z výsledků lze konstatovat, že v oblasti mostních závěrů vznikají kritická místa, na která je nutné se při ověřování interakce kolej–most zaměřit. V těchto oblastech dochází ke kumulaci napětí vlivem zhuštění, nebo naopak vlivem řídnutí kolejového lože. Tento stav může vést ke ztrátě stability koleje či je-

jímu porušení. Tato oblast zatím nebyla přesně určena, ale z dosavadních výsledků je zřejmé, že může dosahovat až několik metrů od mostního závěru.

Na obrázcích 12 a 13 jsou zobrazené hodnoty podélného odporu po délce mostu v kN/m, je na nich vidět vyzorované chování v oblastech mostních závěrů, kde hodnoty dosahují vyšších hodnot.



Obrázek 12 - Průběh podélného odporu pro Interval 1



Obrázek 13 - Průběh podélného odporu pro Interval 2

6. ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byla provedena analýza zaměřená na stanovení podélného odporu nezátěžené koleje. z dosažených výsledků však nebylo možné určit jednu univerzální hodnotu podélného odporu pro celý most. k určení podélného odporu je nezbytné konstrukci rozdělit na oblasti s rozdílným chováním – konkrétně na oblast v okolí mostních závěrů, kde dochází k řídnutí nebo stlačování kolejového lože, a na část konstrukce bez přímého vlivu mostních závěrů. Na základě analýzy lze konstatovat, že v oblasti mostních závěrů dosahuje podélný odpor přibližně hodnoty 36 kN/m, zatímco v ostatních částech konstrukce se pohybuje kolem 20 kN/m.

Z výsledků je zřejmé, že podélný odpor v blízkosti mostních závěrů je výrazně vyšší než v neovlivněných úsecích konstrukce. v budoucnu by bylo vhodné věnovat těmto oblastem zvýšenou pozornost a hodnoty podélného odporu ověřit laboratorními zkouškami.

Během práce byla rovněž formulována hypotéza o rozdílném chování kolejového lože při vzniku deformací a při jejich odlehčení. Tato hypotéza naznačuje, že podélný odpor by mohl vykazovat odlišné hodnoty při zatížení kolejového lože změnami teploty nosné konstrukce oproti situaci při jeho odlehčení.

Jinými slovy, chování odporové křivky by mohlo být nesymetrické. Bohužel z časových důvodů nebylo možné tuto teorii blíže ověřit, a proto by bylo vhodné se jí věnovat v budoucím výzkumu.

Součástí práce bylo také ověření efektivního součinitele teplotní roztažnosti α . Na základě tohoto součinitele byly konstrukce kalibrovány tak, aby hodnoty z modelu odpovídaly posunům v ložiscích naměřeným během monitoringu. Ukázalo se, že tento součinitel je proměnlivý v závislosti na období, a proto nelze stanovit jeho jednoznačnou hodnotu. Výsledné hodnoty jsou přehledně uvedeny v tabulkách 5 a 6.

Spř. kce	Jaro	Léto	Podzim	Zima
Oteplení	8.8E-06	9.3E-06	-	-
Ochlazení	6.5E-06	9.3E-06	-	-

Obl. kce	Jaro	Léto	Podzim	Zima
Oteplení	7.7E-06	0.0E+00	-	-
Ochlazení	6.9E-06	9.9E-06	-	-

Obrázek 14 - Efektivní součinitel teplotní roztažnosti

Pro zajištění přesnějších výsledků by bylo vhodné konstrukci doplnit o větší množství snímačů teploty a tenzometrů. Pokud by nebylo možné realizovat tento krok, doporučuji alespoň instalaci tenzometrů v dostatečné vzdálenosti před konstrukcí, což by umožnilo eliminovat vliv napětí od přetvoření kolejnice přicházejícího ze širé trati. Bez této doplňkové instrumentace není možné provádět přesné analýzy.

Nedostatek snímačů teploty způsobuje, že změny teploty je nutné v modelu zadávat jako lineární zatížení, což neodpovídá skutečnému rozložení teploty. Dalším doporučením by bylo instalovat dvojici tenzometrů – jeden přímo nad snímačem posunů a druhý ve vhodné vzdálenosti. Oba tenzometry by přitom měly být umístěny ve stejné oblasti napětí, aby vykazovaly shodné znaménko napětí a tím bylo možné stanovit předběžný podélný odpor. Tato konfigurace by mohla přispět k přesnějšímu vyhodnocení chování konstrukce.

Poděkování

Tento článek vznikl za finanční podpory ČVUT v Praze v rámci projektu SGS25/037/OHK1/1T/11.

References

- [1] SŽ. Předpis SŽ S3/2 Bezстыková kolej. 2013
- [2] SŽDC. Mostní vzorový list MVL 150 Kombinovaná odevza mostu a koleje. 2016
- [3] ČSN EN 1991-2 ed. 2. Eurokód 1: Zatížení konstrukcí: Část 2 Zatížení mostů dopravou. ČNI, 2005
- [4] POUR, Robert. Analýza monitoringu interakce most-kolej na železničním mostě [online]. Praha, 2024 [cit. 2024-10-06]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/113920>. Diplomová práce. ČVUT fakulta stavební. Vedoucí práce prof. Ing. Pavel Ryjáček Ph.D.
- [5] PLÁŠEK, Otto, Pavel ZVĚŘINA, Richard SVOBODA a Vojtěch LANGER. Železniční stavby II. 2006.
- [6] *DYNAMIKA železničních mostů*. Svobodova 1, 128 17, Praha 2: Polygrafia, 1992. ISBN 80-200-0262-6.
- [7] ČSN EN 1991-1-5: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí: Část 1-5 Obecná zatížení – Zatížení teplotou. ČNI, 2005
- [8] SŽ S3 díl XII – Účinnost od 1. října 2008