

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ



## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

### Posouzení interakce most – kolej na mostě metra Stodůlky

The track-bridge interaction analysis  
of the tube bridge in Stodůlky

**Josef Bis**

Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby  
Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.  
Katedra: Ocelových a dřevěných konstrukcí

**2020**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

|   |                     |                             |
|---|---------------------|-----------------------------|
| Příjmení: <b>Bis</b>  | Jméno: <b>Josef</b> | Osobní číslo: <b>468600</b> |
| Zadávací katedra: <b>Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí</b> |                     |                             |
| Studijní program: <b>Stavební inženýrství</b>                     |                     |                             |
| Studijní obor: <b>Konstrukce a dopravní stavby</b>                |                     |                             |

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

|   |  |
|---|--|
| Název bakalářské práce: <b>Posouzení interakce most – kolej na mostě metra Stodůlky</b>   |  |
| Název bakalářské práce anglicky: <b>The track-bridge interaction analysis of the tube bridge in Stodůlky</b>  |  |
| Pokyny pro vypracování:<br>Prohlídka mostu a koleje mostu metra ve Stodůlkách, posouzení interakce most - kolej s ohledem na možnost odstranění dilatačního zařízení. |  |
| Seznam doporučené literatury:<br>- ČSN EN 1991-2<br>- ČSN EN 1993-2   |  |
| Jméno vedoucího bakalářské práce: <b>doc. Ing. Pavel Ryjáček, Ph.D.</b>   |  |
| Datum zadání bakalářské práce: <b>20.02.2020</b>  | Termín odevzdání bakalářské práce: <b>24.05.2020</b> |
| <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>   |  |
| Podpis vedoucího práce  | Podpis vedoucího katedry                             |

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

|                       |                     |
|-----------------------|---------------------|
| Datum převzetí zadání | Podpis studenta(ky) |
|-----------------------|---------------------|

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 24. května 2020

.....

Josef Bis

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Pavlu Ryjáčkovi, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce, cenné připomínky, důležité poznatky a užitečné rady při konzultacích této práce. Zároveň bych chtěl poděkovat za ochotu a možnost konzultovat téměř kdykoliv. Speciální poděkování patří rodině, která mě trpělivě podporovala a přihlížela při tvorbě této práce.

## **Abstrakt**

Cílem této bakalářské práce je posouzení možnosti zřízení bezстыkové koleje přes most metra Stodůlky. Pro výpočet je třeba vytvořit numerický 3D model s interakčními parametry co nejlíže reálnému stavu. Součástí této práce je prohlídka mostního objektu.

## **Klíčová slova:**

ocelový most, železniční most, metro, komorový nosník, bezстыková kolej, BK, interakce, most-kolej, kombinovaná odezva

## **Abstract:**

The goal of this Bachelor thesis is an assessment of the possibility of establishing continuous welded rail over the Stodůlky tube bridge. For the calculation it is necessary to create a numerical 3D model with interaction parameters as close as possible to the real state. A part of this thesis is dedicated to an inspection of the bridge.

## **Keywords:**

steel bridge, railway bridge, tube, box girder bridge, continuous welded rail, CWR, interaction, track-bridge, combined response

# Obsah

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1      | Úvod.....   | 8  |
| 2      | Zpráva o prohlídce mostu .....  | 9  |
| 2.1    | Identifikační údaje.....  | 9  |
| 2.2    | Základní údaje o mostu .....  | 9  |
| 2.3    | Nosná konstrukce a její ztužení.....                                      | 11 |
| 2.4    | Spodní stavba .....   | 11 |
| 2.5    | Ložiska .....   | 12 |
| 2.6    | Uložení koleje na mostě a za mostem .....                                 | 13 |
| 2.7    | Mostní vybavení.....  | 14 |
| 3      | Bezстыková kolej.....   | 16 |
| 3.1    | Historie bezстыkové koleje .....  | 16 |
| 3.2    | Teorie bezстыkové koleje.....   | 16 |
| 3.3    | Uložení bezстыkové koleje na mostě .....                                  | 18 |
| 3.4    | Parametry ovlivňující kombinovanou odezvu mostu a bezстыkové koleje ..... | 19 |
| 3.4.1  | Železniční svršek .....   | 19 |
| 3.4.2  | Způsob uložení koleje .....   | 19 |
| 3.4.3  | Upínací teplota .....   | 19 |
| 3.4.4  | Proměnnost teploty v kolejnici po její délce.....                         | 19 |
| 3.4.5  | Změna teploty mostu.....  | 19 |
| 3.4.6  | Zatížení vlivem brzdných a rozjezdových sil .....                         | 19 |
| 3.4.7  | Tuhost spodní stavby .....  | 20 |
| 3.4.8  | Mostní závěry.....  | 20 |
| 3.4.9  | Umístění kolejnicových dilatačních zařízení .....                         | 20 |
| 3.4.10 | Nadzdvížení koleje v důsledku natočení nosné konstrukce.....              | 20 |
| 3.4.11 | Deformace nosné konstrukce v důsledku zatížení mostu .....                | 21 |
| 3.4.12 | Konstrukční řešení mostu .....  | 21 |
| 4      | Cíl práce .....   | 22 |
| 5      | Zatížení .....  | 23 |
| 5.1    | Zatížení stálé .....  | 23 |
| 5.2    | Svislé pohyblivé zatížení.....  | 23 |
| 5.3    | Dynamické účinky.....   | 23 |
| 5.4    | Brzdné a rozjezdové síly .....  | 24 |
| 5.5    | Zatížení rovnoměrnou teplotou .....                                       | 24 |



---

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 5.5.1  | Zatížení rovnoměrnou teplotou na nosné konstrukci..... | 24 |
| 5.5.2  | Zatížení rovnoměrnou teplotou v koleji.....            | 26 |
| 6      | Výpočetní model.....                                   | 27 |
| 6.1    | Princip výpočetního modelu.....                        | 27 |
| 6.2    | Výpočetní model .....                                  | 27 |
| 6.3    | Průřezy .....  | 29 |
| 6.4    | Parametry trati .....                                  | 30 |
| 6.5    | Použité parametry.....                                 | 31 |
| 6.6    | Pevné ložisko.....                                     | 33 |
| 6.7    | Tuhost spodní stavby.....                              | 34 |
| 6.8    | Zatěžovací stavy .....                                 | 35 |
| 6.9    | Kombinace .....  | 39 |
| 6.10   | Výsledky.....  | 40 |
| 6.10.1 | Model 1 – současný stav .....                          | 40 |
| 6.10.2 | Model 2 – bezstyková kolej .....                       | 44 |
| 7      | Posouzení .....  | 50 |
| 7.1    | Model 1 – stávající stav.....                          | 50 |
| 7.1.1  | Posouzení napětí v kolejnici .....                     | 51 |
| 7.1.2  | Posouzení limitních deformací .....                    | 52 |
| 7.2    | Model 2 – bezstyková kolej .....                       | 54 |
| 7.2.1  | Posouzení napětí v kolejnici .....                     | 54 |
| 7.2.2  | Posouzení limitních deformací .....                    | 55 |
| 8      | Závěr .....  | 58 |
|        | Seznam použité literatury .....                        | 59 |
|        | Seznam obrázků .....                                   | 60 |
|        | Seznam tabulek .....                                   | 62 |
|        | Seznam příloh .....                                    | 63 |



# 1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá prohlídkou, přepočtem a posouzením možnosti převedení bezстыkové koleje přes most metra. Mostní objekt se nachází v Praze v městské části Stodůlky na lince metra B mezi stanicemi Lužiny a Hůrka (dříve SNP). Jedná se o dvojkolejný ocelobetonový komorový most s dolní mostovkou.

První část se zabývá obecnými informacemi, technickým a konstrukčním řešením mostního objektu, přilehlých ramp a železničního svršku. Informace získané z původní stavební dokumentace byly ověřeny při prohlídce mostu.

V následující kapitole je přiblížena problematika bezстыkové koleje, hlavní myšlenka, historie a její výhody. Také jsou zde rozebrány parametry ovlivňující interakci mostu a bezстыkové koleje.

Výpočet zatížení od městské kolejové dopravy a zatížení vlivem změny teploty je popsáno v kapitole pět.

Další kapitola se věnuje sestavení 3D prutového modelu v programu SCIA Engineer 19.1. V této části jsou také popsány všechny parametry použité ve výpočtovém modelu.

V sedmé kapitole jsou popsány vybrané výsledky v rozhodujících průřezech a jejich porovnání s limitními hodnotami dle ČSN.

Závěrem této práce je vytvoření odpovídajícího výpočetního modelu pro posouzení stávajícího stavu a následné posouzení možnosti zřízení bezстыkové koleje vedené přes mostní objekt.





## 2 Zpráva o prohlídce mostu

### 2.1 Identifikační údaje

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| Katastrální území:                   | Praha – Stodůlky                         |
| Staničení mostu:                     | km 6,848 133 P. K. až km 7,224 989 P. K. |
| Rok uvedení do provozu:              | 1994                                     |
| Délka mostu:                         | 375 m                                    |
| Počet polí:                          | 9  |
| Počet kolejí:                        | 2  |
| Rychlost na mostu/trat'ová rychlost: | 80/80 km/h                               |

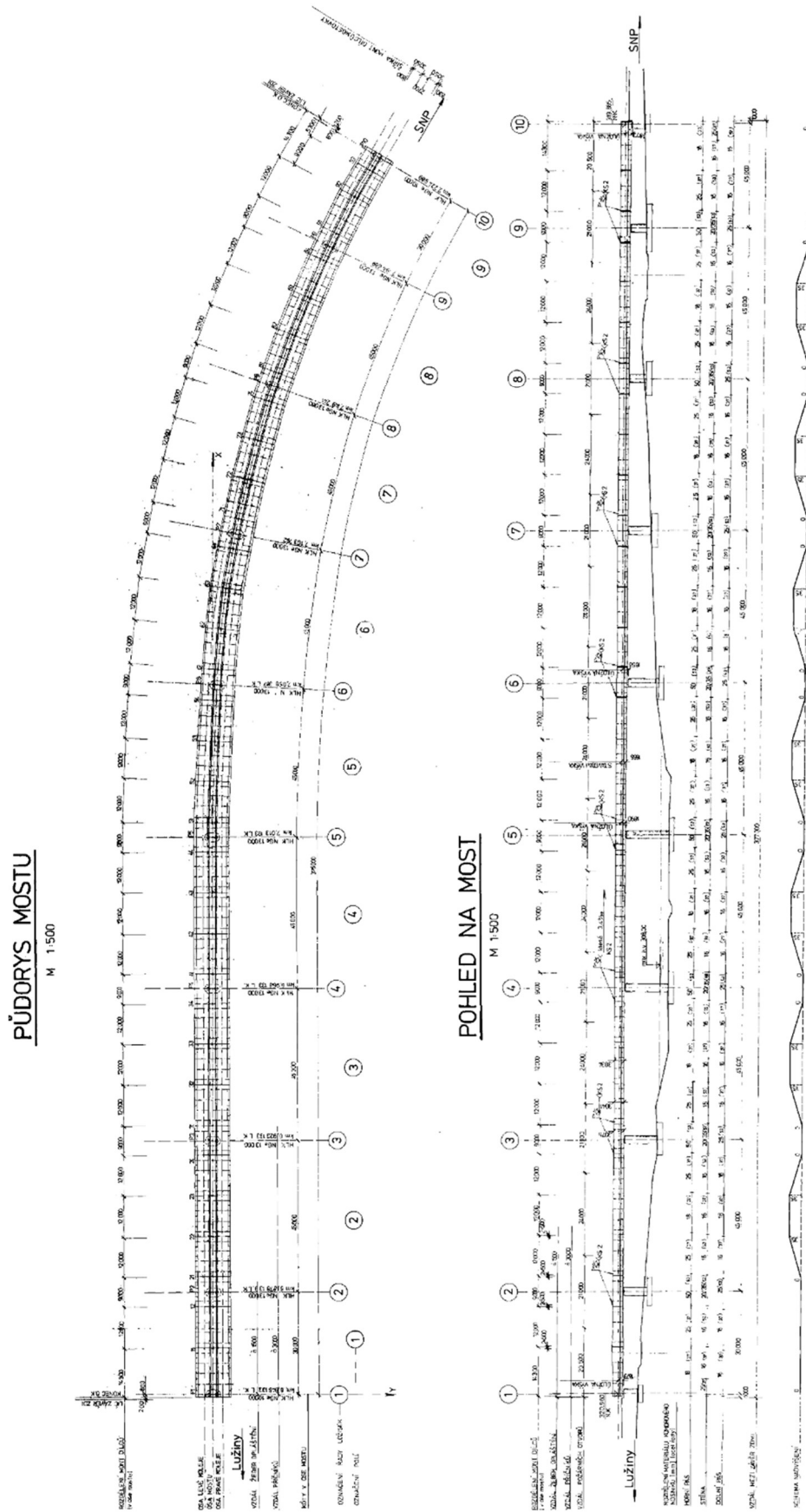
### 2.2 Základní údaje o mostu

Most linky B pražského metra se nachází ve Stodůlkách (Praha 13), kde přemostňuje Centrální park a Nepomucký rybník v údolí Prokopského potoka. Část mostu je v přímé (cca 152,0 m), část v přečhodnici (cca 72,0 m) a část v oblouku o poloměru  $R = 353,0$  m (délka cca 151,0 m). Niveleta koleje klesá ve směru staničení se sklonem 3,4 ‰.

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| Délka ocelové konstrukce:    | 376,600 m |
| Délka přemostění:            | 372,800 m |
| Sklon nivelety:              | 3,4 ‰     |
| Stavební výška:              | 1,666 m   |
| Celková výška s opláštěním:  | 3,075 m   |
| Maximální výška nad terénem: | 17,000 m  |

|                          |             |          |
|--------------------------|-------------|----------|
| Teoretické rozpětí polí: | pole 1 a 10 | 30,000 m |
|                          | pole 2 ÷ 9  | 45,000 m |





obr. 1 Podélný řez a půdorys mostu [1]

## 2.3 Nosná konstrukce a její ztužení

Most je navržen jako ocelová obetonovaná konstrukce se středním komorovým nosníkem a spodní mostovkou. Tvoří spojitý nosník o 9 polích o celkové délce 376,6 m. Rozpětí polí 30 m + 7 x 45 m + 30 m. Trám je situován do osy os kolejí. Ve spodní části komorového nosníku je provedeno napojení příčných konzol a plechu mostovky, které jsou součástí mostovkové desky. Mostovková deska přenáší pouze zatížení od vlaků metra. Zatížení větrem a sněhem působící na tubus je přenášeno příčnými žebry na konzoly a komorový nosník.

Výška komorového nosníku v poli je 3 034 mm, nad pilíři 3 075 mm. Šířka v poli je 1 832 mm, nad pilíři 1 870 mm. Horní pásnice je šířky 1 850 mm z plechů tloušťky 18,25 mm a 50 mm v závislosti na průřezu. Dolní pásnice je šířky 1 900 mm z plechů tloušťky 16 mm a 25 mm. Komora nosníku je vyztužena příčnými diafragmaty z profilů T výšky cca 400 mm ve vzdálenostech 3,0 m. Diafragmata jsou rámová, aby byl umožněn průchod komorovým nosníkem. Diafragma nad ložisky jsou tužší, z profilů tvaru T výšky cca 600 mm. Stabilita tlačných stěn je zajištěna podélnými výztuhami tvaru T.

Komorový nosník je spřažen s železobetonovou deskou, která slouží jako protipožární ochrana. Spřažení je realizováno pomocí spřahovacích trnů  $\varnothing$  18,2 mm, délky 135 mm. Tloušťka betonové desky na stěnách je 150 mm, na horní pásnici 150 mm až 182 mm.

Mostovka je ortotropní deska z plechu tloušťky 12 mm a přivařených podélných a příčných výztuh tvaru T. Maximální výška příčnicku je 880 mm, výška stěny podélníků je 250 mm.

## 2.4 Spodní stavba

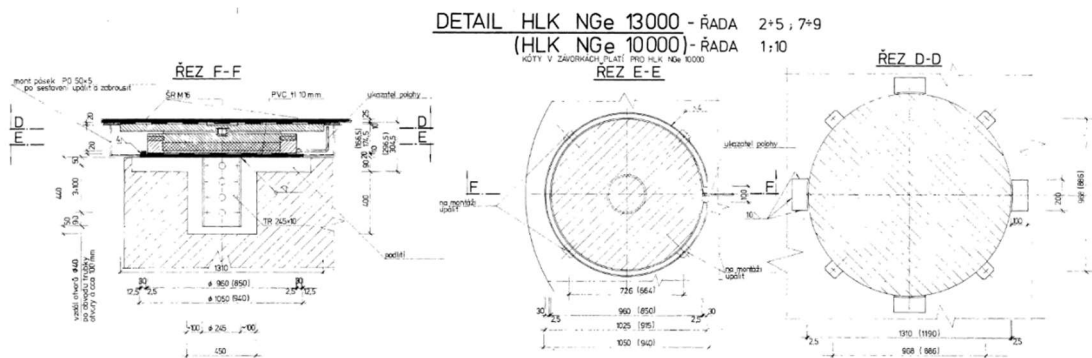
Spodní stavba mostu je tvořena 8 pilíři. Pilíře jsou navrženy jako železobetonové sloupy oválného tvaru (2,3 m x 3,5 m) z betonu C25/30 (B330 dle dřívější normy ČSN 73 2001: 1970) a výšky 4,2 m až 14 m. Hlavy pilířů jsou upraveny pro osazení mostních ložisek a zvedacích lisů pro jejich výměnu. Dříky pilířů jsou vetknuty do základových roštů z betonu C25/30 (dříve B330) rozměrů 9,6 m x 9,6 m tloušťky 1,4 m (pilíře 2 ÷ 8). Každý rošt je tvořen 9 pilotami z betonu C16/20,  $\varnothing$  1200 mm délky 9 m až 12 m. Pro pilíř 9 je navržen atypický rošt rozměrů 9,6 m x 10,6 m odstupňované výšky 1,4 m a 1,8 m.

Opěry jsou součástí přilehlých ramp. Konstrukci západní rampy tvoří železobetonový truhlík, jehož výška se směrem k mostu zvětšuje a je zakončena příčnou závěrnou stěnou a podporou mostu č. 1. Vlastní podpora č. 1 je řešena obdobně jako ostatní podpory mostu. Skládá se z poloviny mostního pilíře a přechodové části na konstrukci rampy. Objekt tvoří přechod mezi plošně založenými traťovými tunely a na pilotách založenou mostní konstrukcí. Proto pod podporou mostu č. 1 jsou navrženy 4 piloty  $\varnothing$  1200 mm, zbývající část objektu je založena plošně na monolitické základové desce.

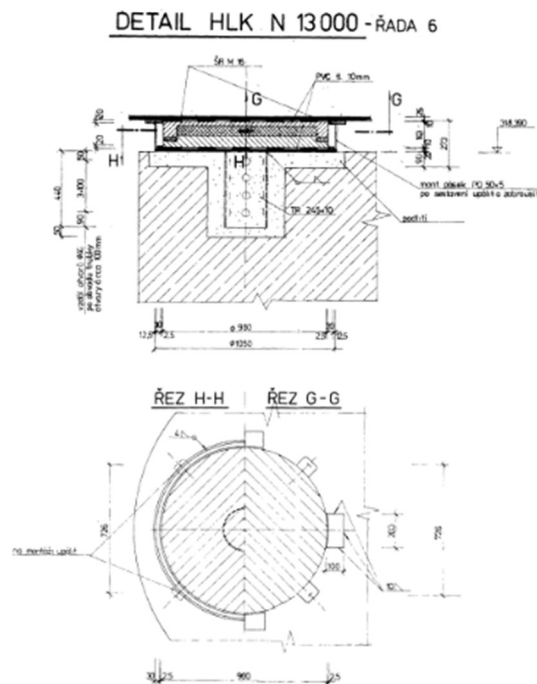


## 2.5 Ložiska

Všechna ložiska na mostě jsou navržena jako ložiska hrncová, na každém pilíři jsou umístěna 2 ložiska. Pevné ložisko je umístěno na pilíři č. 6, přibližně uprostřed délky přemostění viz. obr. 1. Na opěrách 1 a 10 to jsou ložiska posuvná 2 x HLK NGe 10 000. Na pilíři 6, který tvoří pro most pevné, neposuvné uložení jsou umístěna pevná ložiska 2 x HLK N 13 000. Na ostatních pilířích jsou umístěna jednosměrně posuvná ložiska 2 x HLK NGe 13 000. Aby nedocházelo na opěře 1 a 10 k nadzdvížení ložisek při nesymetrickém zatížení, jsou konce mostu přikotveny pomocí 2 kotevnicích šroubů M 100x4. I když jsou ložiska navržena tak, aby zachycovala vodorovné síly, přesto v nich dojde k určitým posunům, dokud není vyčerpána vůle mezi jednotlivými částmi ložiska. Maximální hodnota vůle v nezátíženém ložisku nesmí přesahovat větší z hodnot 0,2 % průměru elastomerové vložky nebo 1,0 mm.



obr. 3 Posuvné ložisko HLK NGe 13 000 [1]



obr. 2 Pevné ložisko HLK N 13 000 [1]

## 2.6 Uložení koleje na mostě a za mostem

Kolej na mostě je vedena jako bezстыková kolej s normálním rozchodem 1 435 mm. Železniční svršek je tvořen šterkovým ložem s dřevěnými pražci, na kterých je upevněna kolejnice tvaru S49. Na mostě je použito podkladnicové upevnění typu K s tuhou svěrkou ŽS 3.



obr. 4 Upevnění K se svěrkou ŽS 3, montovaný spoj

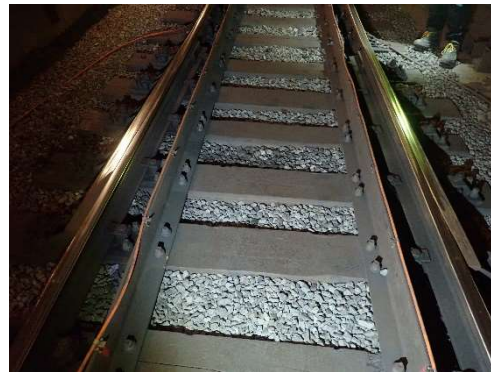
Na rampě východ směr stanice Lužiny je kolej uložena stejně jako na mostě, na pražcích ve šterkovém loži a podkladnicovým upevněním typu K. Za rampou západ směr stanice Hůrka (dříve SNP) je použito bezpražcové upevnění s podkladní deskou.



obr. 5 Bezpražcové upevnění

Na východní rampě (směr stanice Lužiny) jsou umístěna 2 kolejová dilatační zařízení. Velké kolejové dilatační zařízení (VDZ) je umístěno ve vzdálenosti 3,6 m od závěrné zídky, malé kolejové dilatační zařízení (MDZ) je umístěno přibližně 35 m od konce mostu. Na MDZ navazuje bezстыková kolej pokračující směrem do stanice Lužiny.





obr. 6 Kolejové dilatační zařízení

Na západní rampě je umístěno velké kolejové dilatační zařízení ve vzdálenosti 3,6 m od závěrné zídky a montovaný styk ve vzdálenosti 10,5 m od závěrné zídky. Za montovaným stykem pokračuje bezstyková kolej směr stanice Hůrka.

Na mostě jsou realizovány izolované kolejové styky. Pro elektrické odizolování jsou použity plastové vložky. V celé délce mostu jsou umístěny pojistné úhelníky včetně jejich dilatací.



obr. 7 Izolovaný styk

obr. 8 Dilatace pojistných úhelníků

## 2.7 Mostní vybavení

Celá konstrukce mostu je uzavřena v ocelovém tubusu vytvářejícím dopravní prostor metra. Tubus je šířky 12,4 m a výšky 7,0 m, za opěrami navazuje na shodně tvarované nájezdni rampy. Tubus s nosnou ocelovou konstrukcí nespolutpůsobí.

Komorový nosník je pochozí v celé délce mostu, pro umožnění kontroly nosíku je uvnitř nosníku navržena lávka z roštů. V každém mostním poli je otvor s protipožárním poklopem zajišťující přístup do komory nosníku.

Přesto, že je most chráněn tubusem, je zřízeno odvodnění mostovky z důvodu údržby tubusu. Jedná se o systém svodů procházející výpalem v mostovce pod mostovku a přes výpal stěny komorového nosníku do žlabu svahovanému k pilíři (opěře).

Na stěnách komorového nosníku a na nosné konstrukci opláštění jsou upevněna korýtka pro vedení kabelů sdělovacích a zabezpečovacích zařízení a kabely nízkého napětí.

Osvětlení je zřízeno po celé délce mostu a je upevněno na nosnou konstrukci tubusu.



*obr. 9 Korýtka pro kabely*

## 3 Bezстыková kolej

### 3.1 Historie bezстыkové koleje

Železniční síť se rozvíjela souběžně s technickým posunem v 19. a 20. století. Zpočátku se používaly pouze koleje stykované, přestože dilatační kolejové styky způsobují nehomogenitu jízdní dráhy, a tím místo častých závad nejen na konstrukci železničního svršku, ale i na podvozcích drážních vozidel. Kromě častých závad je kolejnicový styk i významným zdrojem hluku a nepohodlí pro cestující. Kvůli dynamickým účinkům došlo k zákazu používání kolejnicových styků na mostech, proto se hledaly cesty k odstranění těchto rušivých vlivů.

Prvním krokem bylo zvětšení délky kolejnic až na 60 m a tím zmenšení počtu styků, které proběhlo už před druhou světovou válkou. Současně se vyvíjela konstrukce železničního svršku, zejména upevnění. Zásadním poznatkem bylo, že změna délky kolejnic, způsobená tepelnými změnami, není úměrná její délce. Kolejnicovému pásu s kvalitním upevněním je bráněno v podélném posunu za vzniku napětí v kolejnici. Toto zjištění podpořilo realizaci konstrukce bezстыkové koleje na úkor kolejnic s četnými dilatačními styky.

Bezстыková kolej je tvořena dlouhými kolejnicovými pásy upevněnými na podpory, zpravidla příčné pražce v kolejovém loži. První experimentální pokusy s dlouhými kolejnicovými pásy byly provedeny v USA v letech 1933 až 1935. Průkopníkem této moderní konstrukce železničního svršku u nás byl prof. Ing. Dr. Josef Vaverka, DrSc., který publikoval vlastní teorii o redukci a vyloučení dilatačních spár v roce 1937. První úsek bezстыkové koleje byl u ČSD zřízen v roce 1954.

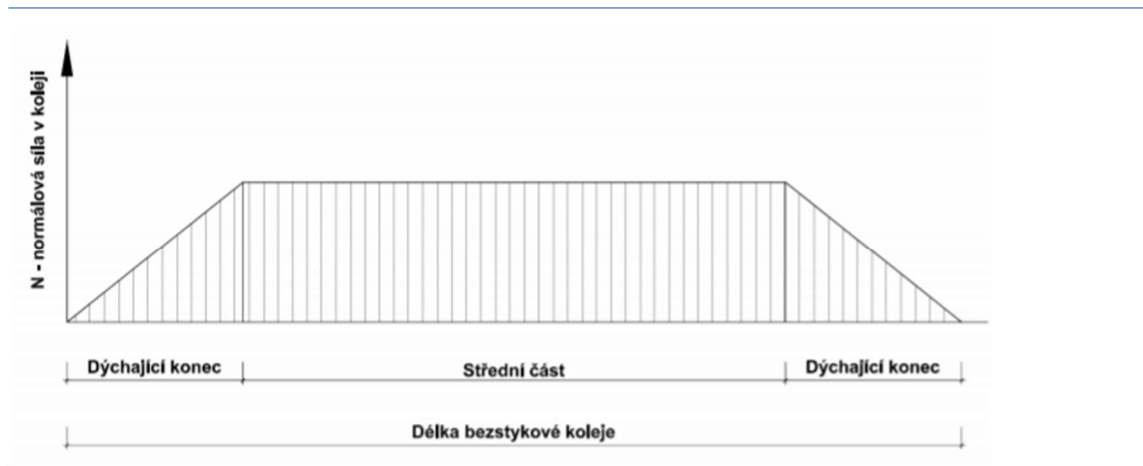
### 3.2 Teorie bezстыkové koleje

Bezстыková kolej je kolej s průběžně svařenými a při dovolené upínací teplotě upnutými kolejnicemi v kolejích i výhybkách. Minimální délka bezстыkové koleje je 150 m. Charakteristickým znakem bezстыkové koleje je nerovnoměrné rozložení teplotních účinků po délce koleje. V koncových částech, zvaných dýchající konec, dochází k dilataci omezené odporem proti posunu kolejnice v upevnění a posunu pražců. Ve střední části teoreticky nedochází k teplotní dilataci kolejnicových pásů. Teplotní změny se projeví pouze změnou napětí v kolejnici. Při kladné změně teploty vznikají tlakové síly, což může představovat zvýšené riziko vybočení koleje vlivem vzpěrného tlaku. Při záporné změně teploty vznikají v kolejnici tahové síly, což v krajním případě může mít za následek lom kolejnice.

Délka dýchajících konců bezстыkové koleje v podmínkách na tratích SŽDC je při největším teplotním rozdílu až 75 m. Každá bezстыková kolej musí mít dva dýchající konce, proto nejkratší délka bezстыkové koleje je 150 m.







obr. 10 Průběh vnitřní normálové síly v bezстыkové koleji [6]

Pro správnou funkci bezстыkové koleje musí být její pásy upnuty při dovolené teplotě. Při znalosti této upínací teploty a skutečné teploty kolejnice, lze dopočítat hodnotu podélného napětí a podélné osové síly v kolejnici. Pro střední část bezстыkové koleje platí, že osové síly v koleji jsou přímo úměrné teplotnímu zatížení a nezávisí na délce koleje.

$$N_x = -EA_R \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

kde:  $N_x$  je normálová síla v bezстыkové kolejnici

$E$  je modul pružnosti kolejnicové oceli [kN/m<sup>2</sup>]

$A_R$  je průřezová plocha dvou kolejnic [m<sup>2</sup>]

$\alpha$  je součinitel tepelné roztažnosti kolejnic [K<sup>-1</sup>]

$\Delta T$  je teplotní rozdíl mezi aktuální a upínací teplotou kolejnic [K]

Pro dýchající konec platí, že posun koleje vůči zemnímu tělesu již není nulový a že směrem ke konci koleje se síly snižují. Změna osové síly v koleji je úměrná podélnému odporu koleje proti posunutí a spojitému podélnému zatížení brzdnými nebo rozjezdovými silami.

$$N_x = EA \cdot \left( \frac{du}{dx} - \alpha \Delta T \right)$$

kde  $u(x)$  je funkce podélného posunutí koleje [m]

Změnu osové síly uvažovanou po délce koleje, lze spočítat pomocí podélného odporu koleje proti posunutí a spojitému podélnému zatížení brzdnými nebo rozjezdovými silami.

$$\frac{dN_x}{dx} = r_x - q_x$$

kde:  $r_x$  je podélný odpor proti posunutí [kN/m]

$q_x$  je spojitě zatížení rozjezdovými nebo brzdnými silami [kN/m]



K posunu koleje a tělesa železničního spodku může docházet nejen vlivem teplotních změn, ale i vlivem působení vnějšího zatížení, konkrétně brzdných a rozjezdových sil. Podélný odpor je obecně funkcí nelineárně závislou na podélném posunutí koleje. Pro tento klíčový parametr lze bezpečně uvažovat lineární závislost na posunutí koleje.

$$r_x = k \cdot u$$

kde:  $k$  je konstanta vyjadřující tuhost kolejového lože a závislost mezi posunutím koleje a podélným odporem na zemním tělese [kN/m<sup>2</sup>],

$u$  je podélné posunutí koleje [m].

Pro kolej v širé trati lze dosazením předchozích vztahů do rovnice definovat diferenciální rovnici posunutí závislou na podélném vodorovném zatížení.

$$-EA \frac{d^2 u}{dx^2} + k \cdot u = q_x$$

### 3.3 Uložení bezстыkové koleje na mostě

Mezi bezстыkovou kolejí a mostem dochází k vzájemnému pohybu, a to i ve střední části, která v širé trati nemění svoji délku ani pozici vůči tělesu železničního spodku. Kromě teplotních dilatací mostu se také projevují brzdné a rozjezdové síly a také deformace mostní konstrukce od provozního zatížení.

V kolejnici vzniká přídavné napětí od silových účinků. O velikosti silového ovlivňování rozhoduje rozložení kolejnicových dilatačních zařízení, tedy jestli přes most vede nepřerušená bezстыková kolej nebo zdali je kolej na mostě oddělena pomocí kolejnicových dilatačních zařízení. Dále závisí na statickém a konstrukčním uspořádání mostního objektu, typu a umístění mostovky a také na způsobu uložení koleje.

V případě velké tlakové síly hrozí vybočení kolejnice, v případě síly tahové naopak lom. Silové ovlivňování mezi kolejí a mostní konstrukcí vzniká při vzájemném rozdílu podélného posunutí mezi kolejí a mostním objektem. Chování, ke kterému dochází při ovlivňování sil v mostní konstrukci a koleji nazýváme „Kombinovaná odezva mostní konstrukce a koleje“.



obr. 11 Schéma průběhu normálové síly  $N_x$  v kolejnici v důsledku spolupůsobení mostní konstrukce a koleje [6]

### 3.4 Parametry ovlivňující kombinovanou odezvu mostu a bezстыkové koleje

Interakce bezстыkové koleje a mostu je ovlivňována mnoha různými parametry.

#### 3.4.1 Železniční svršek

Železničním svrškem a jeho únosností v širé trati se zabývá předpis SŽDC S3 Železniční svršek. Dle tohoto předpisu je třeba v konkrétních případech stanovit namáhání za daných nebo předpokládaných podmínek. Do celkového napětí v běžné trati přispívá zatížení dopravou, zatížení změnou teploty a zbytkové napětí vznikající při výrobě.

#### 3.4.2 Způsob uložení koleje

Zásadním parametrem vstupujícím do interakce bezстыkové koleje a mostu je způsob uložení koleje na mostě a jeho tuhost. Právě tato tuhost závisí na tuhosti kolejového lože a tuhosti upevnění.

#### 3.4.3 Upínací teplota

Pravidla pro zřizování bezстыkové koleje stanovuje předpis SŽDC S3/2 Bezстыková kolej. Dovolená upínací teplota je dle tohoto předpisu v rozmezí od +17 do +23 °C. Při nedodržení daného rozmezí může vést k nepředpokládanému namáhání kolejnicových pásů. Pokud aktuální počasí nedovoluje zřízení bezстыkové koleje, lze kolejnice ohřát nebo zchladit k dosažení požadované délky a teploty.

#### 3.4.4 Proměnnost teploty v kolejnici po její délce

Pokud je hodnota teploty konstantní po celé délce mostu a v jeho přilehlých částech, potom je i napětí v kolejnici konstantní a na interakci koleje a mostu nemá tato změna vliv. Pokud není tato podmínka splněna, pak vlivem různé teploty kolejnice dochází k vodorovnému posunu koleje, který vyvolá přírůstek vodorovné reakce v ložisku.

#### 3.4.5 Změna teploty mostu

Změna teploty mostu je důvodem k interakci mostu a koleje, která je úměrná podélné tuhosti uložení koleje. S rostoucí tuhostí roste i přírůstek napětí v kolejnici. Na podélnou tuhost má vliv způsob uložení koleje na mostě. Dalším faktorem je typ nosné konstrukce mostu. Vyšší součinitel tepelné roztažnosti a vyšší tepelná vodivost způsobují obvykle větší teplotní změny u mostů ocelových, než tomu je u mostů spřažených či ocelobetonových.

#### 3.4.6 Zatížení vlivem brzdných a rozjezdových sil

Vodorovné rozjezdové a brzdné síly působí na kolej a jsou přenášeny kolejovým roštem a kolejovým ložem do nosné konstrukce. Podle tuhosti spodní stavby se pak roznáší do opěr, pilířů a základů.

Pro vlaky metra se uvažuje velikost rozjezdové i brzdné síly 15 % svislého pohyblivého zatížení podle odstavce 5.2, které lze umístit na vyšetřovanou konstrukci. Na dvoukolejném mostě je třeba uvažovat podélné síly ve stejném směru, tedy na jedné koleji brzdné a na druhé rozjezdové.

Posun vznikající od brzdných a rozjezdových sil závisí na tuhosti spodní stavby a je omezen maximálními hodnotami. Pro mosty s nepřerušenu bezстыkovou kolejí 5 mm, pro mosty s kolejnicovým dilatačním zařízením na obou stranách 30 mm. Posuny větší

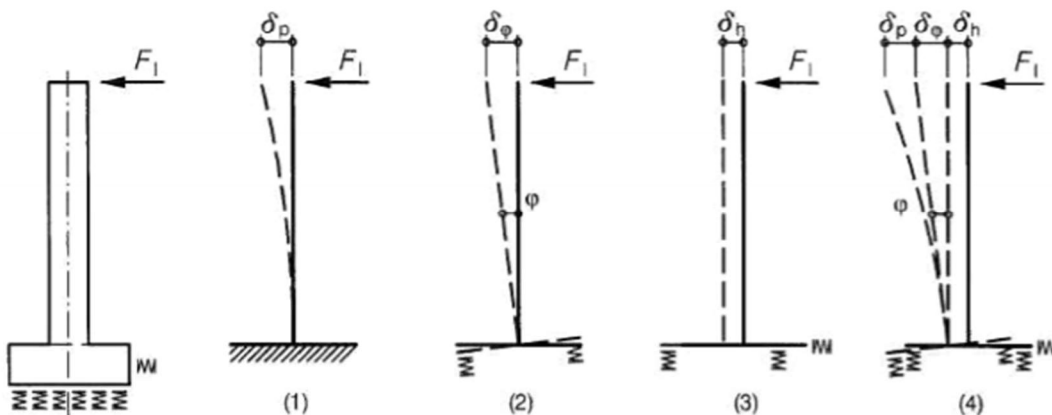


než 30 mm je nutno kompenzovat kolejovým dilatačním zařízením a prepážkou v kolejovém loži.

### 3.4.7 Tuhost spodní stavby

Posun nosné konstrukce je často způsoben vodorovnou deformací spodní stavby. Posunu spodní stavby brání její tuhost, kterou je třeba stanovit z parametrů zemin určených na základě geotechnického průzkumu. Tuhost pilíře lze pak určit podle ohybu pilíře při zatížení jednotkovou silou  $\delta_p$ , posunutí vlivem pootočení základu  $\delta_\varphi$ , posunu základu  $\delta_h$ . Celkovou tuhost pilíře lze vyjádřit vztahem:

$$K = \frac{F_1}{(\delta_p + \delta_\varphi + \delta_h)}$$



obr. 12 Příklad stanovení tuhosti spodní stavby [6]

Nejvýznamnější účinky vyvolává krátkodobé zatížení, mezi které patří zatížení teplotou a zatížení brzdnými nebo rozjezdovými silami.

### 3.4.8 Mostní závěry

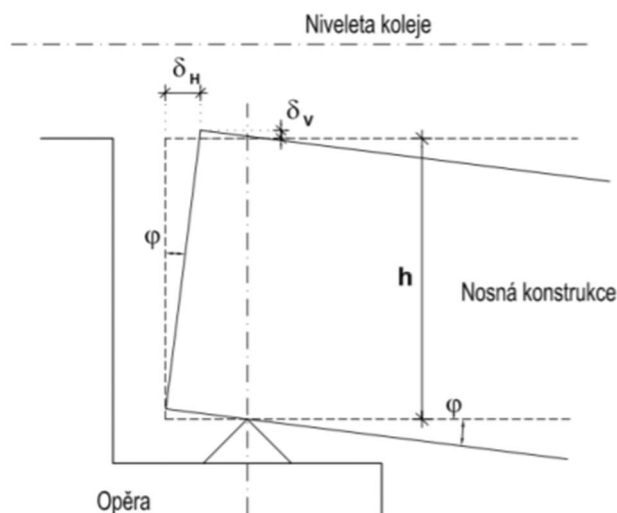
Těsné mostní závěry lze použít pouze při malých dilatačních posunech. Patří mezi ně závěry lamelové či kobercové, jejichž hlavní výhodou je vodotěsnost. Otevřené mostní závěry se používají při větších dilatačních posunech. Kolejové lože je v místě závěru oddělené prepážkou, která zabraňuje zředování kolejového lože, ale umožňuje dilatační posun. Prepážku je nutno doplnit kolejnicovým dilatačním zařízením a odvodem vody.

### 3.4.9 Umístění kolejnicových dilatačních zařízení

Umísťování styků na mostech je v současné době zakázáno z důvodu omezení dynamických rázů, které by mohly nepříznivě působit na nosnou konstrukci. Kolejnicové dilatační zařízení lze umístit do míst, kde končí zemní těleso a začíná mostní objekt.

### 3.4.10 Nadzdvížení koleje v důsledku natočení nosné konstrukce

V důsledku působení svislého zatížení vzniká natočení nosné konstrukce nad opěrou. Vlivem natočení vzniká vodorovný a svislý posun horního okraje konstrukce. Tyto posuny způsobí další přírůstky napětí v kolejnici. Posun kolejnice způsobí zvětšení normálové síly a vlivem nadzdvížení vznikne ohybový moment. Vodorovný posun konce nosné konstrukce a zároveň nadzdvížení nosné konstrukce závisí na natočení konstrukce, velikosti deformace a tuhosti nosné konstrukce.

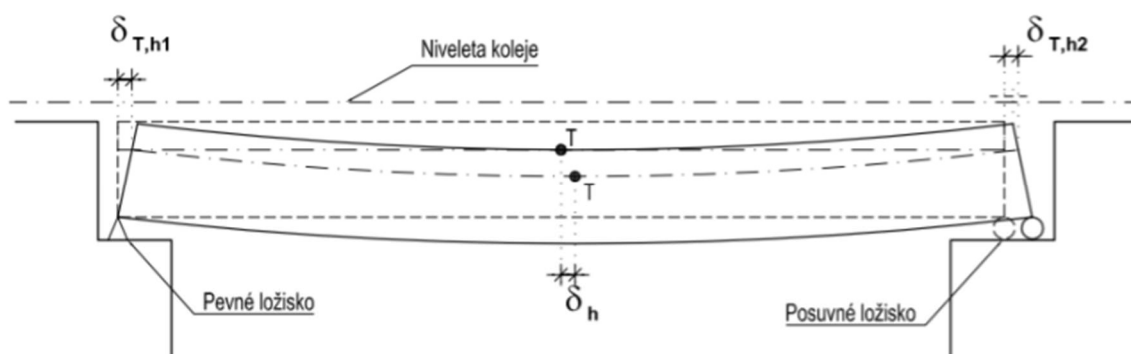


obr. 13 Schéma deformace nosné konstrukce nad opěrou v důsledku zatížení mostu [6]

Norma ČSN EN 1991-2 omezuje posun  $\delta_h$  maximálními hodnotami. V případě, že se uvažuje s kombinovanou odezvou mostu, je maximální posun 8 mm. Svislý posun  $\delta_v$  se omezuje hodnotou 3 mm pro rychlosti do 160 km/h a 2 mm pro rychlosti nad 160 km/h.

#### 3.4.11 Deformace nosné konstrukce v důsledku zatížení mostu

Zatížením mostu dopravou dojde k natočení průřezu nosné konstrukce a protažení spodních vláken. Tím se celá konstrukce posune směrem od pevného ložiska k ložisku posuvnému. To vyvolá nárůst normálové síly v koleji. Vliv deformace na posun mostu je znázorněn na obr. 14.



obr. 14 Schéma deformace nosné konstrukce nad opěrou v důsledku zatížení mostu [6]

#### 3.4.12 Konstrukční řešení mostu

Spolupůsobení bezстыkové koleje a mostu je odlišné pro různá statická řešení mostu. Jiné chování nastane pro prostá pole a jiné pro spojitě nosníky. Proto je třeba s bezстыkovou kolejí počítat již v primárním návrhu mostu. V České republice jsou dle předpisu SŽDC S3 pro kolej na mostě stanoveny předpoklady a podmínky, které závisí na typu nosné konstrukce a jeho související dilataci. Zároveň se projevuje i upevnění mostního svršku.

## 4 Cíl práce

Cílem této práce je prověření chování bezстыkové koleje pro stávající stav mostu, kdy jsou na každém konci mostního objektu umístěna kolejová dilatační zařízení. Dalším krokem je posouzení bezстыkové koleje pro stav, kdy jsou vyjmuta kolejová dilatační zařízení a kolejnice jsou svařeny do jednoho dlouhého pásu.

V následujících kapitolách je vypočteno zatížení, které má vliv na interakci most – kolej. Dále jsou určeny interakční parametry ovlivňující spolupůsobení. Všechny tyto poznatky jsou poté zaneseny do numerického modelu mostu a přilehlé koleje. Na výpočetní model navazují vybrané výsledky a posouzení kritických průřezů.



## 5 Zatížení

V rámci posudku jsou uvažována pouze zatížení relevantní pro posouzení interakce bezстыkové koleje s mostní konstrukcí. Jedná se o zatížení, která mohou způsobit podélný posun NK mostu vůči bezстыkové koleji, čímž dojde k vnesení namáhání do koleje.

### 5.1 Zatížení stálé

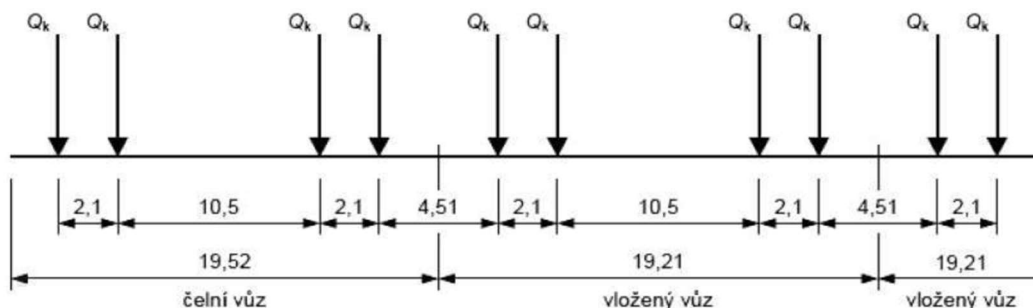
Stálé zatížení je do konstrukce vneseno ještě před zřízením bezстыkové koleje. Deformace mostu od stálého zatížení tedy bezстыkovou kolej nezatíží a na interakci tudíž nemá vliv.

### 5.2 Svislé pohyblivé zatížení

Na trase metra B se pohybují soupravy typu 81 - 71 M. Každá souprava je složena z vozů v pořadí M2t1 + 4Mt1 + 3Mt1 + 4Mt1 + 2Mt1. Každý vůz má 2 podvozky o dvou nápravách. Dle podkladů získaných od dopravního podniku je hmotnost plně obsazeného vozu 50t, hmotnost na jednu nápravu je potom 12,5t. Rozhodující však bude norma ČSN EN 1991-2/Z1, zatížení městskou kolejovou dopravou, která poskytuje doplňující pokyny potřebné pro stanovení zatížení mostů městskou kolejovou dopravou. Tato norma předepisuje nápravové síly o velikosti 16t.

Svislé pohyblivé zatížení vozidly metra se nahrazuje zatěžovacím vlakem o 5 vozidlech s délkou čelního vozu 19,52 m a dalších vozů 19,21 m podle obrázku (obr. 4). Tento vlak je nedělitelný a umístí se vždy jeden na každou kolej kdekoli po délce mostní konstrukce. Nápravové síly o charakteristických hodnotách  $Q_k = 160$  kN a jejich uspořádání je uvedeno na obrázku (obr. 4).

Zatěžovací vlak se umístí na ověřované části konstrukce mostu do takové polohy, aby se dosáhlo největšího účinku. Odlehčujících účinků zatížení se přitom nedbá.



obr. 15 Zatěžovací schéma [4]

### 5.3 Dynamické účinky

Dle ČSN EN 1991-2 6.5.4.3. mohou být související dynamické účinky při posouzení interakce kolej – most zanedbány, kromě lokálních účinků od svislého zatížení na kolejnici.

Dynamické účinky pohyblivého zatížení od kolejových vozidel na tramvajové mosty a mosty metra se stanoví pomocí dynamického součinitele  $\varphi_t$  pro rychlost  $v \leq 80$  km/h se stanoví ze vztahu:

$$\varphi_t = 1 + 0,85(\varphi_3 - 1)$$

kde  $\varphi_3$  je dynamický součinitel podle ČSN EN 1991-2 6.4.5. Dále musí dynamický součinitel  $\varphi_t$  splňovat podmínku:  $1,13 < \varphi_t < 1,68$

$$\varphi_3 = \frac{2,16}{\sqrt{L_\phi} - 0,2} + 0,73$$

$L_\phi$  je náhradní délka, pro spojitý nosník se vypočítá jako:  $L_\phi = k \cdot L_m$ , kde  $L_m$  je aritmetický průměr rozponů polí. Pro počet polí větší než 4 je  $k = 1,5$ .

|                      |                    |
|----------------------|--------------------|
| Náhradní délka       | $L_\phi = 41,67$ m |
| Dynamický součinitel | $\varphi_3 = 1,01$ |
| Dynamický součinitel | $\varphi_t = 1,13$ |

## 5.4 Brzdné a rozjezdové síly

U tramvajových mostů a mostů metra se uvažují účinky rozjezdových a brzdných sil působících v úrovni pojízdné hrany kolejnic. Rozjezdové síly působí proti směru jízdy, brzdné síly ve směru jízdy. Při více kolejích na téže konstrukci se předpokládá, že se souprava v jedné koleji rozjíždí a ve druhé brzdí, takže se účinky sčítají a součet se redukuje na 75 %, v dalších kolejích se tyto síly zanedbávají.

Velikost rozjezdové i brzdné síly tramvajových vozidel i vlaků metra se uvažuje 15 % svislého pohyblivého zatížení podle odstavce 5.2, které lze umístit na vyšetřovanou konstrukci.

|  |                                    |
|--|------------------------------------|
| Charakteristická hodnota svislého zatížení | $Q_k = 160$ kN                     |
| Rozjezdové síly                            | $Q_{lak} = 160 \cdot 0,15 = 24$ kN |
| Brzdné síly                                | $Q_{lbk} = 160 \cdot 0,15 = 24$ kN |

Při pohybu 2 vlaků se uvažuje  $(24+24) \cdot 0,75 = 36$  kN, tedy  $Q_{lak} = Q_{lbk} = 18$  kN

## 5.5 Zatížení rovnoměrnou teplotou

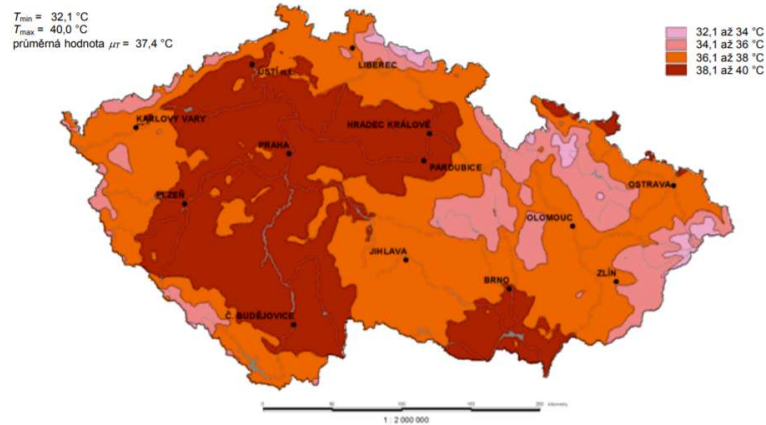
### 5.5.1 Zatížení rovnoměrnou teplotou na nosné konstrukci

Rovnoměrná změna teploty vyvolá změnu délky nosné konstrukce. Relativní posun mezi nosnou konstrukcí a bezстыkovou kolejí vyvolá namáhání v koleji. Maximální a minimální rovnoměrné teploty se stanoví podle ČSN 1991-1-5 na základě map maximálních a minimálních teplot vzduchu ve stínu v místě stavby.



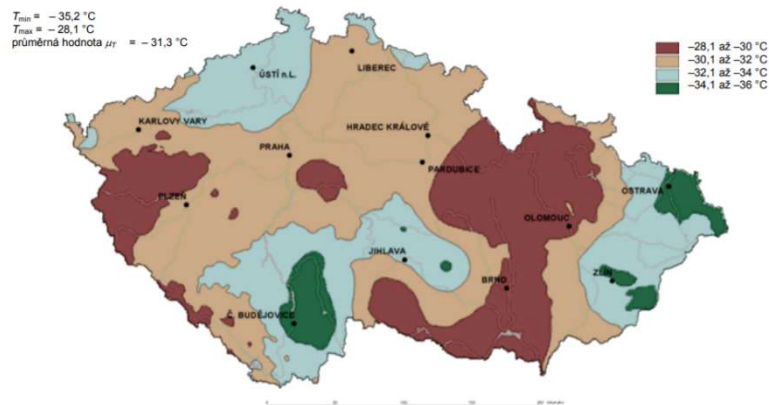


Hodnoty maximální teploty vzduchu ve stínu, která je překročena ročními maximy s pravděpodobností 0,02.



obr. 16 Charakteristické hodnoty maximální teploty vzduchu ve stínu [5]

Hodnoty minimální teploty vzduchu ve stínu, která je překročena ročními minimy s pravděpodobností 0,02.



obr. 17 Charakteristické hodnoty minimální teploty vzduchu ve stínu [5]

Most je umístěn v Praze.

Maximální hodnota teploty vzduchu ve stínu v místě objektu

$$T_{\max} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Minimální hodnota teploty vzduchu ve stínu v místě objektu

$$T_{\min} = -32 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

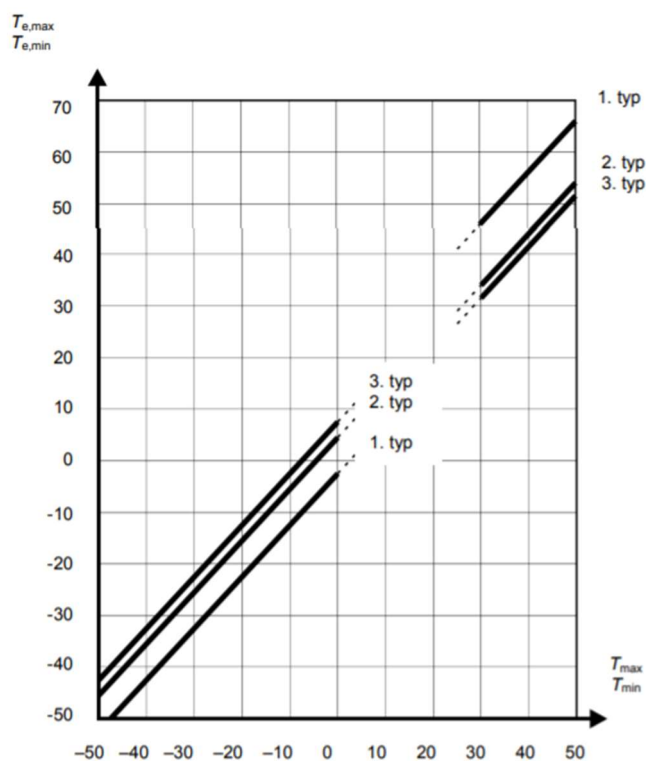
Typ mostu dle ČSN EN 1991-1-5: 2. typ: ocelobetonová konstrukce

Maximální rovnoměrná složka teploty mostu

$$T_{N,\max} = 42 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Minimální rovnoměrná složka teploty mostu

$$T_{N,\min} = -24 \text{ }^{\circ}\text{C}$$



obr. 18 Vztah mezi minimální/maximální teplotou vzduchu ve stínu a minimální/maximální rovnoměrnou teplotou mostu [5]

Pro výpočet oteplení a ochlazení mostu se uvažovalo osazení při teplotě  $T_0 = 10\text{ °C}$ .

Maximální oteplení nosné konstrukce  $\Delta T_{N,exp} = 42 - 10 = 32\text{ °C}$

Maximální ochlazení nosné konstrukce  $\Delta T_{N,con} = -24 - 10 = -34\text{ °C}$

### 5.5.2 Zatížení rovnoměrnou teplotou v koleji

Změna teploty kolejnice vyvolá vznik napětí v kolejnici z důvodu omezení její volné dilatace.

Upínací teplota bezстыkové koleje dle S3/2  $T_0 = 20 \pm 3\text{ °C}$

Maximální rovnoměrná složka teploty koleje dle S3/2  $T_{r,max} = 60\text{ °C}$

Minimální rovnoměrná složka teploty koleje dle S3/2  $T_{r,min} = -30\text{ °C}$

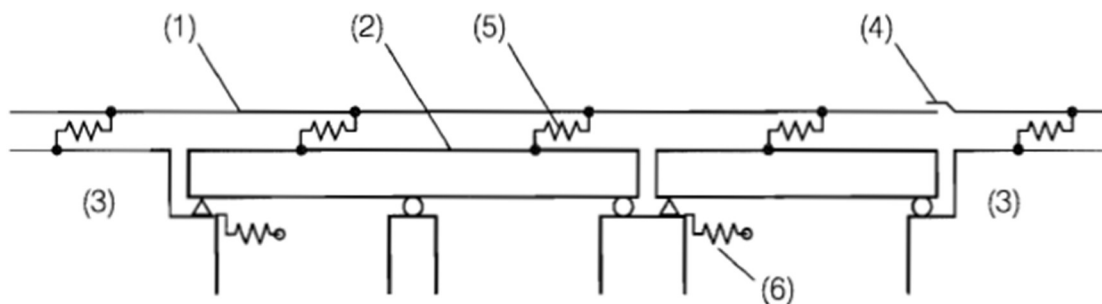
Maximální oteplení koleje  $\Delta T_{R,max} = 60 - 17 = 43\text{ °C}$

Maximální ochlazení koleje  $\Delta T_{R,min} = -30 - 23 = -53\text{ °C}$

## 6 Výpočetní model

### 6.1 Princip výpočetního modelu

Mostní konstrukce jsou navrhovány tak, aby nebylo bráněno změně délky konstrukce vlivem teplotní roztažnosti. Na rozdíl od bezстыkové koleje, kde je volné dilataci bráněno. Z důvodu rozdílných dilatačních možností tak vzniká v kolejnici přídavné namáhání. Vliv na vznik přídavných napětí má také pohyblivé svislé zatížení dopravou a s ním spojené brzdné a rozjezdové síly. Do modelu je však kromě zatížení třeba namodelovat co nejreálněji všechny parametry související s interakcí most – kolej. Možný postup pro tvorbu modelu lze najít i v normě ČSN EN 1992-1 (obr. 19). Parametry trati a spodní stavby jsou modelovány pomocí systémů pružin o různých tuhostech, zároveň je důležité zachovat vzájemnou polohu jednotlivých prvků konstrukce.



obr. 19 Schéma výpočetního modelu [4]

- Popis obrázku:
- (1) Kolej
  - (2) Nosná konstrukce
  - (3) Spodní stavba
  - (4) Kolejové dilatační zařízení
  - (5) Tuhost kolejového lože na mostě
  - (6) Tuhost spodní stavby

Významným parametrem pro posouzení interakce jsou tuhosti pružin reprezentujících odpor koleje vůči podélnému posunutí, tuhosti spodní stavby, tuhosti v ložiskách či svislá tuhost v uložení. Bylo zjištěno, že interakční parametry se liší pro kolej zatíženou a nezatíženou. Zároveň je nutné respektovat způsob upevnění kolejnici na jednotlivých částech konstrukce.

### 6.2 Výpočetní model

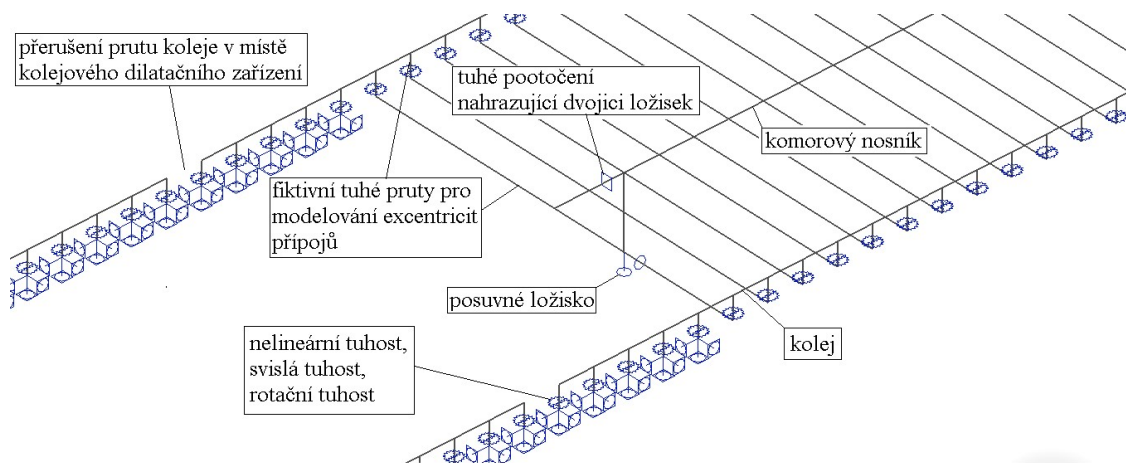
Výpočetní model byl vytvořen v programu SCIA Engineer 19.1. Prutový 3D model zachycuje vzájemnou polohu jednotlivých prvků modelu, ale i jejich podélnou a svislou tuhost. Toho bylo dosaženo modelováním všech nosných prvků jako 1D prutů se skutečnou ohybovou, normálovou i torzní tuhostí. Zohledněno bylo i reálné výškové uspořádání. Ložiska jsou umístěna ve skutečné vzdálenosti od těžiště nosné konstrukce. Opomenuta nebyla ani vzájemná poloha těžiště nosné konstrukce a koleje. Všechny excentricity dané vzájemnou polohou jednotlivých prvků jsou modelovány pomocí

fiktivních prutů s nekonečnou tuhostí a nulovou hmotností. Pro správnost výpočetního modelu nestačí vymodelovat pouze nosnou konstrukci a kolej v délce mostu, je třeba do modelu zavést i přilehlou trať. Proto byla modelována i trať do vzdálenosti 100 m za každou opěrou.

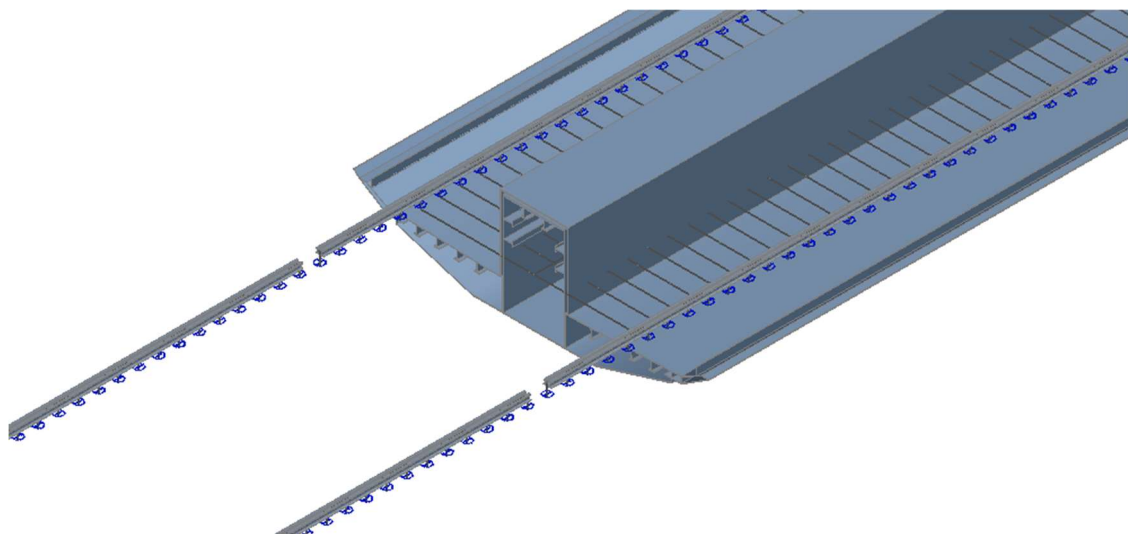
Celkem byly vytvořeny 2 výpočetní modely. První model zachycuje skutečný stav konstrukce. Druhý model popisuje návrh zřízení bezстыkové koleje.

**Model 1 – stávající stav:** Zohledněna jsou dilatační zařízení umístěná za opěrami mostu.

**Model 2 – bezстыková kolej:** Kolej je převedena přes přilehlé rampy i most bez použití kolejových dilatačních zařízení.



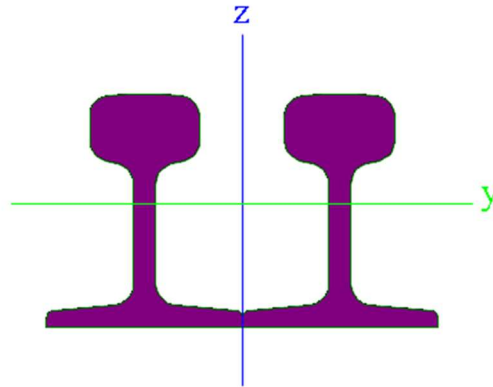
obr. 21 Popis částí výpočetního modelu



obr. 20 Detail modelu nad opěrou O1

### 6.3 Průřezy

Ve výpočetním modelu je každá kolej modelována jedním prutem. Aby průřez neměl nereálně velkou tuhost v kroucení, byly kolejnice přiblíženy k sobě.



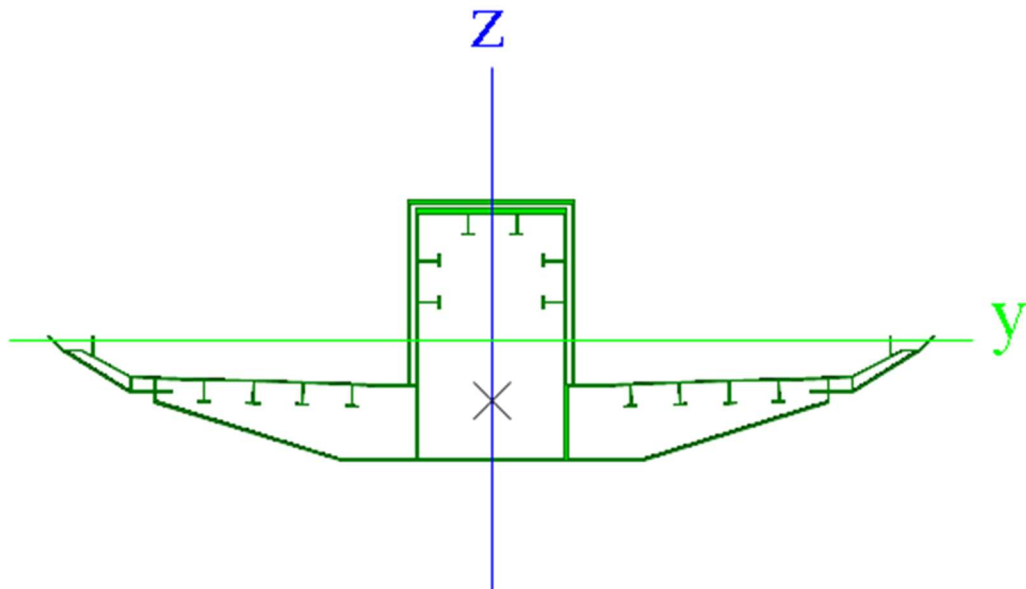
obr. 22 Průřez koleje S49 použitý ve výpočetním modelu

Obetonování hlavního nosníku bylo přepočteno na ocel pomocí poměru modulů pružnosti.

$$n = \frac{E_a}{E_c} = \frac{210 \text{ GPa}}{30,5 \text{ GPa}} = 6,885$$

$$A_c = 1,02 \text{ m}^2$$

$$A_{ca} = 0,148 \text{ m}^2$$



obr. 23 Průřez nosné konstrukce použitý ve výpočetním modelu

Poloha těžiště od spodní hrany komorového nosníku:

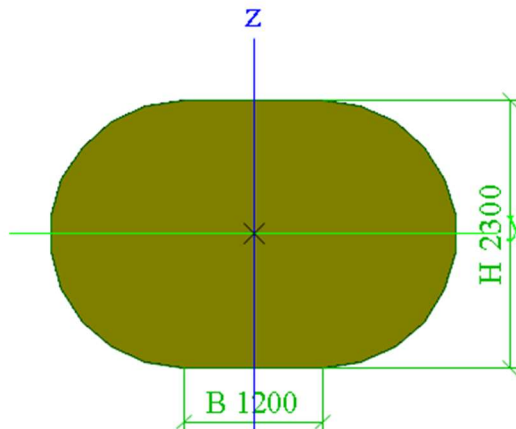
nosník  $z_T = 1,327 \text{ m}$

kolejnice S49  $z_T = 1,670 \text{ m} - 0,149 + 0,073 \text{ m} = 1,694 \text{ m}$

vzájemná poloha těžišť:  $z = 1,694 - 1,327 = 0,367 \text{ m}$



Průřez dřívku pilíře je oválného tvaru o rozměrech 2,3 m x 3,5 m. Poloměr kruhových částí  $R = 1,15$  m.



Obr. 24 Průřez dřívku pilíře použitý ve výpočetním modelu

## 6.4 Parametry trati

Při posouzení interakce most-kolej byla použita bilineární závislost podélného odporu na podélném relativním posunu kolej-most dle ČSN EN 1991-2. V tomto předpisu však není k dispozici hodnota limitního relativního posunu, při kterém přechází pružná deformace v plastickou. Parametry koleje uložené na pražcích ve šterkovém loži jsou uvažovány dle předpisu SŽDC S3. Podélný odpor nezátížené koleje lze uvažovat hodnotou 10 kN/m, podélný odpor zatížené koleje hodnotou 60 kN/m, limitní relativní posun v kolejovém lože je uvažován 2 mm. Podobných výsledků dosáhl i mezinárodní výzkumný projekt prováděný v Delft University of Technology. Při experimentálním měření dospěli k hodnotám kolem 10 kN/m pro nezátíženou kolej a 40 kN/m pro kolej zatíženou. Svislá tuhost je dle předpisu SŽDC S3 uvažována hodnotou 25 MN/m. Tato hodnota odpovídá standardní kvalitě pražcového podloží.

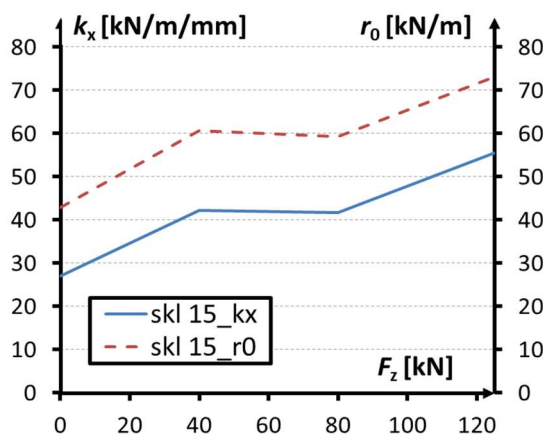
Hodnoty podélného odporu pro kolej s přímým upevněním jsou dle ČSN EN 1991-2 uvažovány maximálními hodnotami 40 kN/m pro nezátíženou trať a 60 kN/m pro trať svisle zatíženou. Limitní relativní posun je možno uvažovat dle předpisu UIC 774-3R, který předepisuje hodnotu 0,5 mm. Pro stanovení podélné tuhosti a limitního relativního posunu bylo využito experimentu provedeném na ČVUT. Hodnoty podélného odporu pro svěrku s normální držečností, pro nezátíženou kolej 43 kN/m, pro zatíženou kolej 59 kN/m. Tyto hodnoty velmi dobře odpovídají parametrům doporučeným normami. Limitní podélný posun pro zatíženou i nezátíženou trať byl dopočítán z experimentálních hodnot podle rovnice:

$$u_x = \frac{r_0}{k_x}$$

kde:  $u_x$  je podélné posunutí koleje [m]

$r_0$  je plastický odpor [kN/m]

$k_x$  je konstanta vyjadřující tuhost upevnění [kN/m<sup>2</sup>]



obr. 25 Interakční parametry DFF 300 s použitou pružnou svěrkou skl 15 v závislosti na svislém přitížení [8]

Svislá tuhost je závislá na tuhosti pružné podložky a typu přímého upevnění koleje.

Dalším důležitým parametrem týkající se upevnění je dostatečná rámová tuhost nebo také odpor proti pootočení kolejnice v upevnění. Pokud uvažujeme posun 2,5 mm na 10 kN na půlku pražce, pak tuhost na ni je  $10\,000/0,0025 = 4\,000\,000\text{ N/m}$ . Milimetr na délce 750 mm (půlka pražce) je úhel 0,00133 rad, rotační tuhost pak bude:

$$\frac{10000 \cdot 1,5}{0,001333334123} = 11\,249\,993,34\text{ Nm/rad} = 11,25\text{ MNm/rad}$$

## 6.5 Použité parametry

Všechny tuhosti je nutné přepočítat na délku 0,6 m koleje.

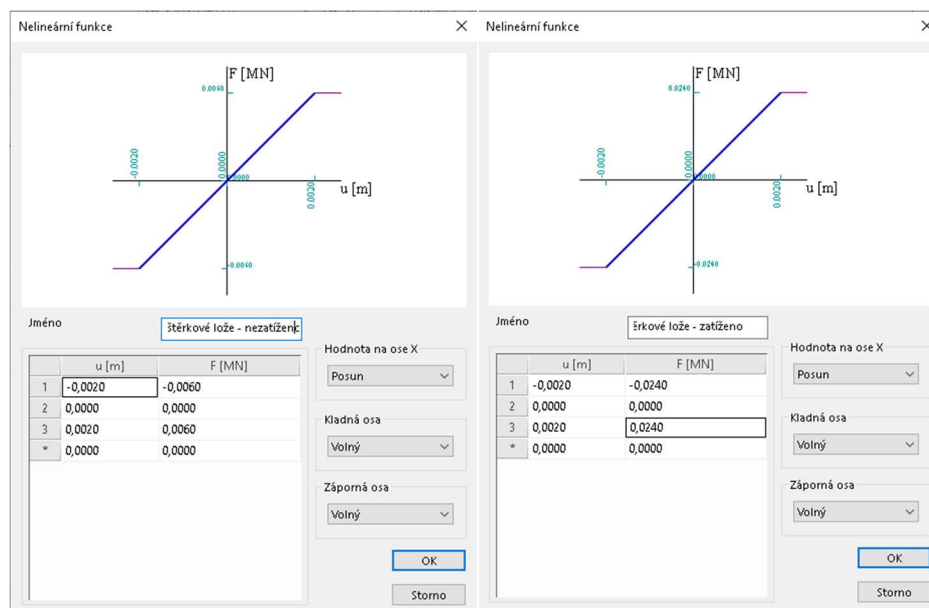
### Kolej ve štěrkovém loži

tab. 1 Nezatížená kolej ve štěrkovém loži

| Nezatížená trať                            | na 1 m    | na 0,6 m  |
|--|-----------|-----------|
| Plastický podélný odpor $r_x$              | 10 [kN/m] | 6 [kN/m]  |
| Limitní relativní posun $u_{x,\text{lim}}$ | 2 [mm]    |           |
| Svislá tuhost $k_z$                        | 25 [MN/m] | 15 [MN/m] |

tab. 2 Zatížená kolej ve štěrkovém loži

| Svisle zatížená trať                       | na 1 m    | na 0,6 m  |
|--|-----------|-----------|
| Plastický podélný odpor $r_x$              | 40 [kN/m] | 24 [kN/m] |
| Limitní relativní posun $u_{x,\text{lim}}$ | 2 [mm]    |           |
| Svislá tuhost $k_z$                        | 25 [MN/m] | 15 [MN/m] |



obr. 26 Nelineární funkce podélného odporu ve štrkovém loži - vlevo nezatížená kolej, vpravo zatížená kolej

## Přímé upevnění

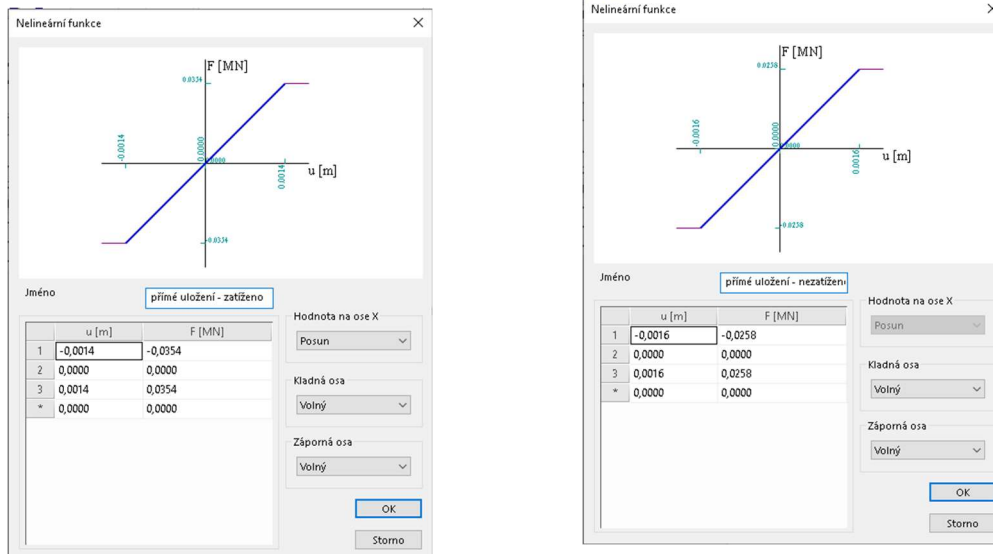
tab. 3 Nezatížená kolej - přímé upevnění

| Nezatížená trať                          | na 1 m    | na 0,6 m    |
|--|-----------|-------------|
| Plastický podélný odpor $r_x$ [kN/m]     | 43 [kN/m] | 25,8 [kN/m] |
| Limitní relativní posun $u_{x,lim}$ [mm] | 1,6 [mm]  |             |
| Svislá tuhost $k_z$ [kN/m]               | 40 [MN/m] | 24 [MN/m]   |

tab. 4 Zatížená kolej - přímé upevnění

| Svisle zatížená trať                | na 1 m    | na 0,6 m    |
|-------------------------------------|-----------|-------------|
| Plastický podélný odpor $r_x$       | 59 [kN/m] | 35,4 [kN/m] |
| Limitní relativní posun $u_{x,lim}$ | 1,4 [mm]  |             |
| Svislá tuhost $k_z$                 | 40 [MN/m] | 24 [MN/m]   |

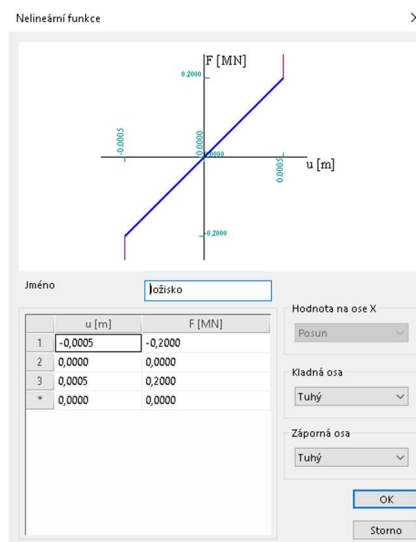




obr. 27 Nelineární funkce podélných odporů pro bezpražcové upevnění - vlevo nezatížená kolej, vpravo zatížená kolej

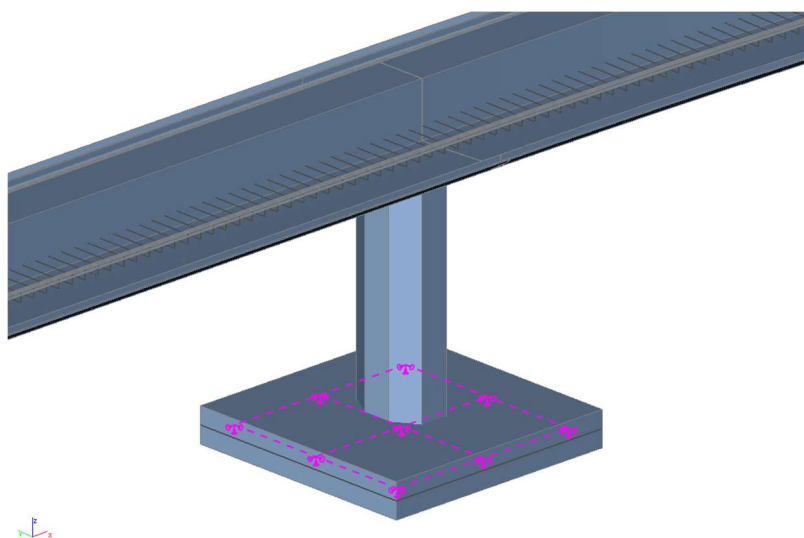
## 6.6 Pevné ložisko

Obě pevná ložiska umístěná na pilíři č.6 jsou hrncová. I když jsou ložiska navržena tak, aby zachycovala vodorovné síly, přesto v nich dojde k určitým posunům, dokud není vyčerpána vůle mezi jednotlivými částmi ložiska. Tento posun je umožněn nastavením podélné a příčné tuhosti kloubu reprezentujícího pevná ložiska. Tuhost byla nastavena tak, aby maximální posun od zatížení změnou teploty byl cca 0,5 mm.



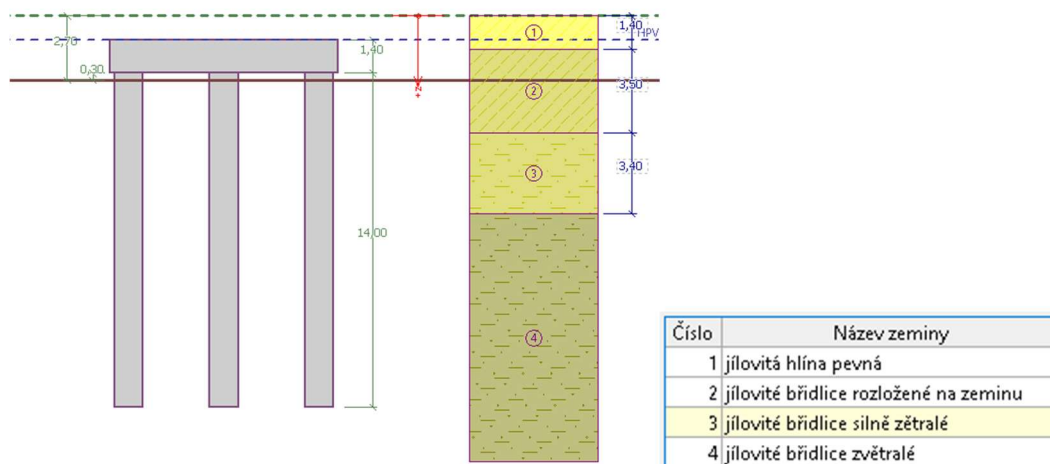
obr. 28 Nelineární funkce podélné tuhosti pro ložisko

## 6.7 Tuhost spodní stavby



obr. 29 Detail spodní stavby pilíře P6

Do modelu byl vnesen dřík pilíře č.6 a jeho základový rošt. Ohybové tuhosti pilíře bylo dosaženo použitím skutečných průřezů a materiálů. Dále bylo třeba nahradit piloty systémem pružin. Výpočet byl proveden v programu GEO5 Skupina pilot. Podkladem pro vytvoření podloží byl geotechnický profil z původní dokumentace [1].



obr. 30 Model spodní stavby v programu GEO5 Skupina pilot

Tento model byl následně zatížen vlastní tíhou dříku a nosné konstrukce a zatížením od dopravy připadající na jeho zatěžovací šířku 45 m. Vodoroné zatížení dopravou má působíště v místě ložiska, proto bylo v modelu nahrazeno odpovídajícím ohybovým momentem v místě vetknutí paty dříku.

Hodnoty zatížení:

Vlastní tíha nosné konstrukce:  $F = 78,5 \cdot 0,85 \cdot 45 = 3\,000 \text{ kN}$

Vlastní tíha dříku:  $F = 23 \cdot 6,915 \cdot 14 = 2\,200 \text{ kN}$

Zatížení dopravou:  $F = 160 \cdot 10 \cdot 2 = 3\,200 \text{ kN}$

$$H = 24 \cdot 10 \cdot 2 = 480 \text{ kN}$$

$$My = H \cdot 14 = 480 \cdot 14 = 6720 \text{ kNm}$$

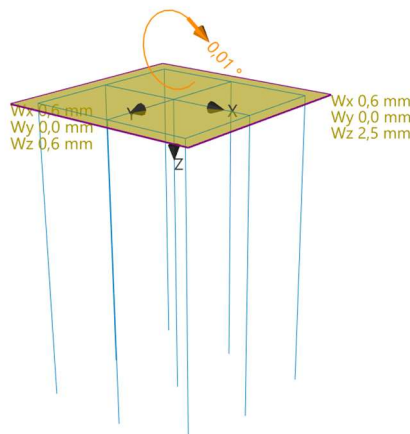
Maximální sednutí = 2,5 mm

Maximální vodorovný posun desky = 0,6 mm

Maximální natočení desky =  $1,1 \cdot 10^{-2}^\circ$

Posunutí ložiska v důsledku natočení základu:  $\delta_\varphi = 14 \cdot \tan\varphi$

$$K = \frac{480 \cdot 10^3}{14 \cdot \tan(1,1 \cdot 10^{-2}) + 0,6 \cdot 10^{-3}} = 219 \text{ MN/m}$$



obr. 31 Výsledné posuny a pootočení základového roštu

Do modelu interakce bezстыkové koleje a mostu je tuhost zavedena pomocí devíti podpor na základové desce, reprezentujících jednotlivé piloty, proto je třeba celkovou tuhost přepočítat na jednu pilotu.

$$K_1 = 24,33 \text{ MN / m}$$

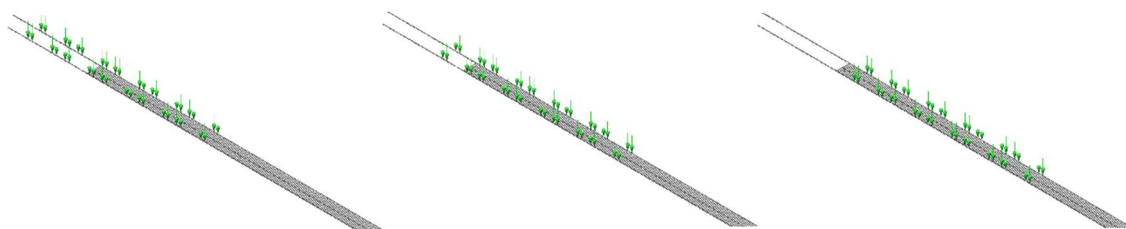
## 6.8 Zatěžovací stavy

Zatěžovací stavy jsou rozděleny podle polohy a charakteru zatížení dopravou. Protože se liší tuhostní vlastnosti pro zatíženou a nezatíženou kolej, bylo třeba vytvořit samostatný model pro každý zatěžovací stav. Pod dopravním zatížením jsou vždy nastaveny interakční parametry pro zatíženou kolej.

Most je dvojkolejný, proto je potřeba zohlednit možnost pohybu jednoho, ale i dvou vlaků metra po konstrukci. Pohyblivé zatížení bylo modelováno s krokem 10 m. Protože však byl předpoklad významných namáhání v místě opěr u modelu 2 s bezстыkovou

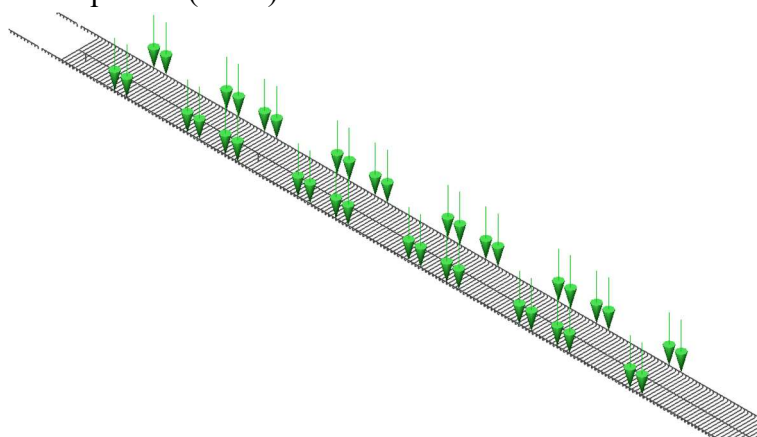
kolejnicí, byl v krajním poli snížen krok na 5 m. Celkem tak bylo vytvořeno 104 variant pro každý model.

Ukázka posunu zatížení po konstrukci (obr. 32), stejným způsobem se pohybují nejen svislé, ale i vodorovné síly.



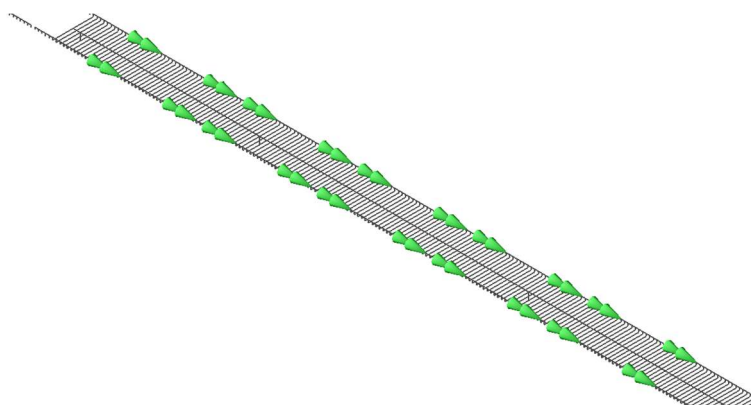
obr. 32 Pohyb zatížení po konstrukci

Svislé zatížení dopravou (ZS12)



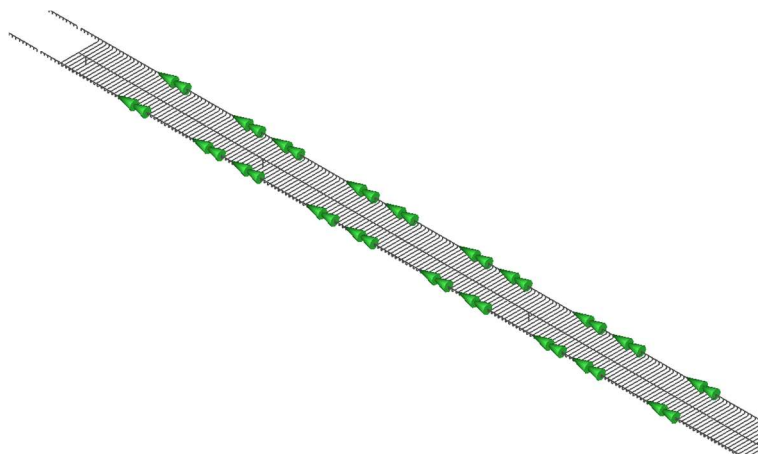
obr. 33 Svislé zatížení dopravou - ZS 12

Vodorovné zatížení dopravou ve směru staničení (ZS12)



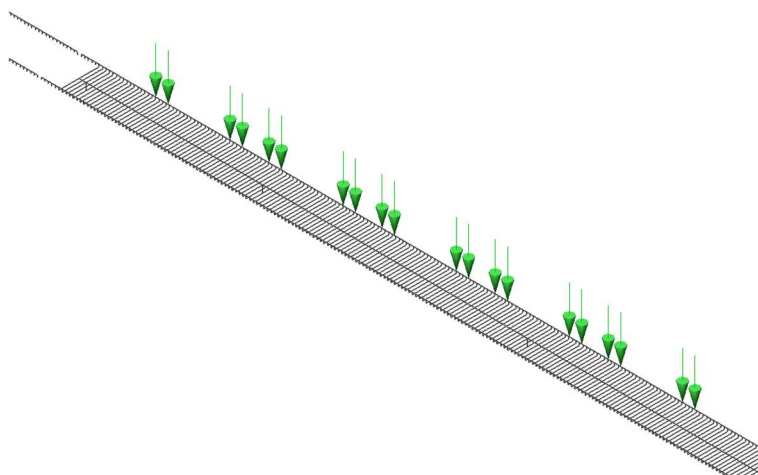
obr. 34 Vodorovné zatížení dopravou ve směru staničení - ZS12

Vodorovné zatížení dopravou proti směru staničení (ZS12)



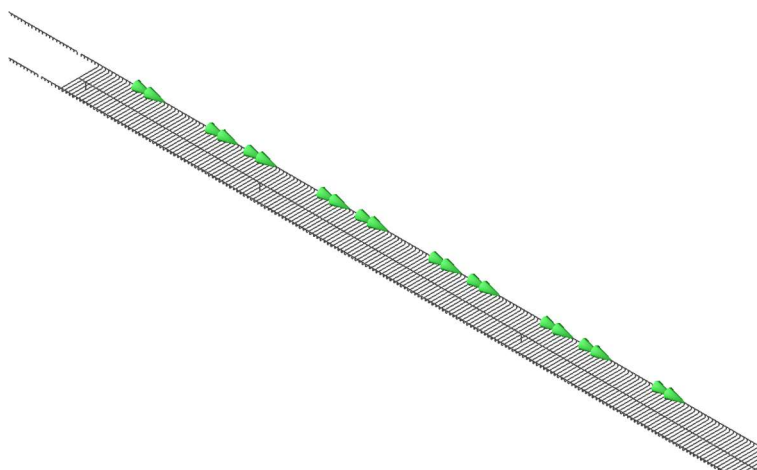
obr. 35 Vodorovné zatížení dopravou proti směru staničení - ZS12

Svislé zatížení dopravou v jedné koleji (ZS12)



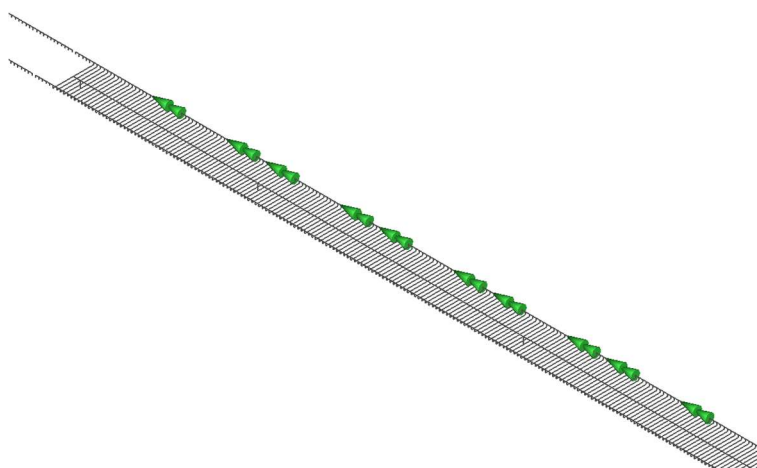
obr. 36 Svislé zatížení dopravou v levé koleji - ZS12

Vodorovné zatížení dopravou v jedné koleji ve směru staničení (ZS12)



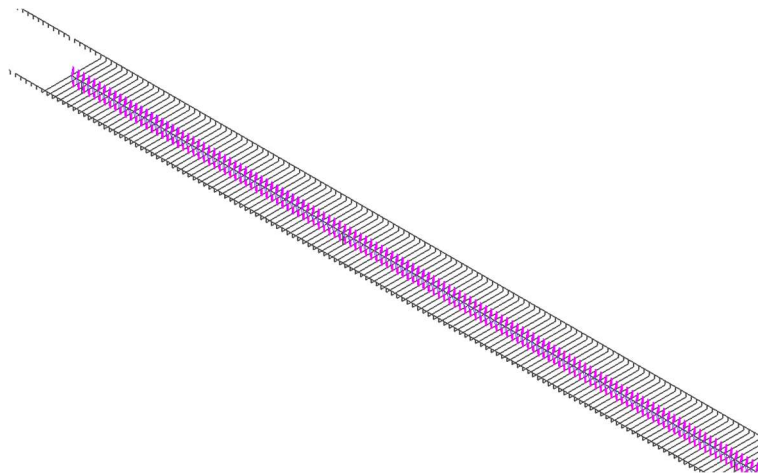
obr. 37 Vodorovné zatížení dopravou v levé koleji ve směru staničení - ZS12

Vodorové zatížení dopravou v jedné koleji proti směru staničení (ZS12)



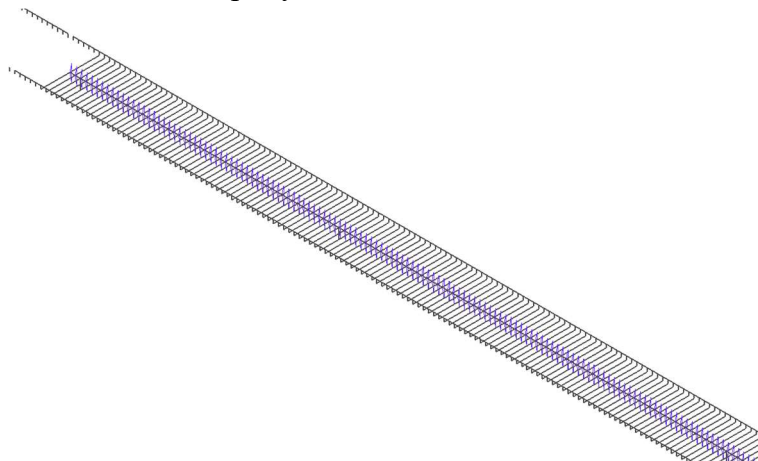
obr. 38 Vodorovné zatížení dopravou v levé koleji proti směru staničení - ZS12

Zatížení změnou rovnoměrné teploty – oteplení



obr. 39 Zatížení rovnoměrnou změnou teploty - oteplení

Zatížení změnou rovnoměrné teploty - ochlazení



obr. 40 Zatížení rovnoměrnou změnou teploty - ochlazení

## 6.9 Kombinace

Dílčí a kombinační součinitele jsou stanoveny v souladu s ČSN EN 1991-2. Pro každý model je využita varianta odpovídající poloze pohyblivého zatížení. Celkem jsou vytvořeny 4 kombinace pro každou polohu zatížení dopravou v jedné i dvou kolejích.

Použité dílčí a kombinační součinitele:

Dílčí součinitel pro zatížení teplotou:

$$\gamma_T = 1,00$$

Kombinační součinitel pro zatížení teplotou:

$$\gamma_{0,T} = 1,00$$

Dílčí součinitel pro svislá zatížení dopravou:

$$\gamma_Q = 1,30$$

Kombinační součinitel pro svislá zatížení dopravou:

$$\gamma_{0,Q} = 1,00$$

Dílčí součinitel pro zatížení brzdnými a rozjezdovými silami:

$$\gamma_A = \gamma_B = 1,30$$

Kombinační součinitel pro svislá zatížení dopravou:

$$\gamma_{0,A} = \gamma_{0,B} = 1,00$$

**Kombinace zatížení**

**KZ1** – oteplení mostu + doprava svislá + doprava vodorovná ve směru staničení

**KZ2** – oteplení mostu + doprava svislá + doprava vodorovná proti směru staničení

**KZ3** – ochlazení mostu + doprava svislá + doprava vodorovná ve směru staničení

**KZ4** – ochlazení mostu + doprava svislá + doprava vodorovná proti směru staničení

**6.10 Výsledky****6.10.1 Model 1 – současný stav**

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledné normálové síly v nejvíce namáhaném průřezu nad podporou č.6. Teplotní účinky byly vypočteny na modelu s nezátíženou kolejí, do výpočtu byla zahrnuta pouze změna teploty nosné konstrukce. Účinky dopravy byly vypočteny na modelu s interakčními parametry zatížené koleje v přetížené oblasti.

tab. 5 Výsledky numerického modelu 1

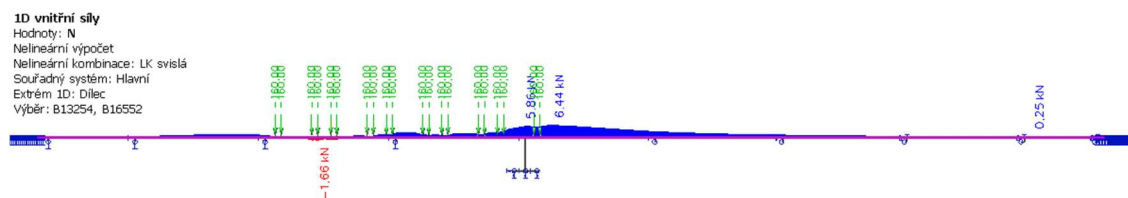
| Posuzovaný průřez |      | ZS 1              |     |                      |     | ZS 2              |     |                      |     | ZS 3              |     |                      |      |
|-------------------|------|-------------------|-----|----------------------|-----|-------------------|-----|----------------------|-----|-------------------|-----|----------------------|------|
|                   |      | teplota + doprava |     | teplota + doprava LK |     | teplota + doprava |     | teplota + doprava LK |     | teplota + doprava |     | teplota + doprava LK |      |
|                   |      | min               | max | min                  | max | min               | max | min                  | max | min               | max | min                  | max  |
| P6                | P.K. | -933              | 882 | -930                 | 881 | -939              | 885 | -937                 | 881 | -944              | 890 | -940                 | 882  |
|                   | L.K. | -935              | 880 | -936                 | 883 | -941              | 887 | -942                 | 883 | -945              | 890 | -946                 | 884  |
|                   |      | ZS 4              |     |                      |     | ZS 5              |     |                      |     | ZS 6              |     |                      |      |
|                   |      | min               | max | min                  | max | min               | max | min                  | max | min               | max | min                  | max  |
| P6                | P.K. | -947              | 892 | -942                 | 883 | -949              | 894 | -945                 | 884 | -950              | 895 | -945                 | 885  |
|                   | L.K. | -946              | 892 | -947                 | 885 | -947              | 893 | -948                 | 886 | -948              | 893 | -949                 | 887  |
|                   |      | ZS 7              |     |                      |     | ZS 8              |     |                      |     | ZS 9              |     |                      |      |
|                   |      | min               | max | min                  | max | min               | max | min                  | max | min               | max | min                  | max  |
| P6                | P.K. | -952              | 897 | -946                 | 884 | -955              | 900 | -948                 | 884 | -958              | 903 | -950                 | 883  |
|                   | L.K. | -949              | 894 | -951                 | 886 | -950              | 895 | -952                 | 886 | -957              | 904 | -956                 | 885  |
|                   |      | ZS 10             |     |                      |     | ZS 11             |     |                      |     | ZS 12             |     |                      |      |
|                   |      | min               | max | min                  | max | min               | max | min                  | max | min               | max | min                  | max  |
| P6                | P.K. | -962              | 907 | -951                 | 895 | -968              | 911 | -952                 | 897 | -970              | 916 | -953                 | 899  |
|                   | L.K. | -955              | 900 | -957                 | 903 | -957              | 902 | -961                 | 905 | -960              | 905 | -965                 | 907  |
|                   |      | ZS 13             |     |                      |     | ZS 14             |     |                      |     | ZS 15             |     |                      |      |
|                   |      | min               | max | min                  | max | min               | max | min                  | max | min               | max | min                  | max  |
| P6                | P.K. | -976              | 922 | -956                 | 900 | -982              | 927 | -958                 | 900 | -985              | 931 | -954                 | 899  |
|                   | L.K. | -963              | 909 | -969                 | 915 | -967              | 912 | -976                 | 922 | -969              | 915 | -979                 | 927  |
|                   |      | ZS 16             |     |                      |     | ZS 17             |     |                      |     | ZS 18             |     |                      |      |
|                   |      | min               | max | min                  | max | min               | max | min                  | max | min               | max | min                  | max  |
| P6                | P.K. | -989              | 936 | -952                 | 898 | -995              | 943 | -949                 | 896 | -1004             | 951 | -947                 | 896  |
|                   | L.K. | -973              | 920 | -986                 | 933 | -980              | 927 | -995                 | 941 | -988              | 936 | -1007                | 958  |
|                   |      | ZS 19             |     |                      |     | ZS 20             |     |                      |     | ZS 21             |     |                      |      |
|                   |      | min               | max | min                  | max | min               | max | min                  | max | min               | max | min                  | max  |
| P6                | P.K. | -1015             | 963 | -946                 | 893 | -1031             | 976 | -945                 | 880 | -1047             | 976 | -944                 | 891  |
|                   | L.K. | -999              | 947 | -1022                | 970 | -1013             | 963 | -1041                | 847 | -1016             | 977 | <b>-1048</b>         | 1009 |



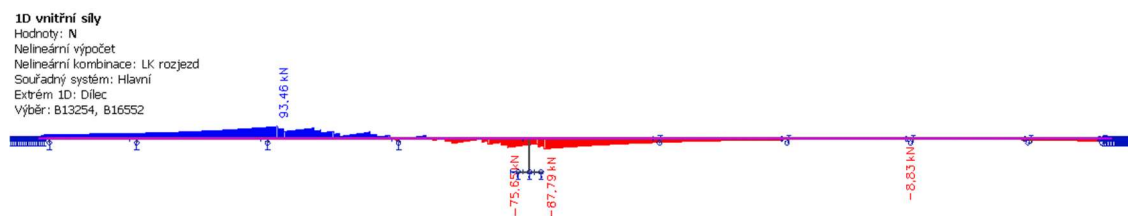
| Posuzovaný průřez |      | ZS 22             |     |                      |      | ZS 23             |      |                      |      | ZS 24             |      |                      |             |
|-------------------|------|-------------------|-----|----------------------|------|-------------------|------|----------------------|------|-------------------|------|----------------------|-------------|
|                   |      | teplota + doprava |     | teplota + doprava LK |      | teplota + doprava |      | teplota + doprava LK |      | teplota + doprava |      | teplota + doprava LK |             |
|                   |      | min               | max | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max         |
| P6                | P.K. | -1012             | 931 | -943                 | 891  | -1008             | 918  | -942                 | 890  | -986              | 882  | -940                 | 888         |
|                   | L.K. | -973              | 940 | -992                 | 960  | -960              | 938  | -976                 | 955  | -923              | 944  | -937                 | 946         |
|                   |      | ZS 25             |     |                      |      | ZS 26             |      |                      |      | ZS 27             |      |                      |             |
|                   |      | min               | max | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max         |
| P6                | P.K. | -986              | 882 | -940                 | 888  | -1000             | 870  | -939                 | 888  | -1008             | 897  | -939                 | 887         |
|                   | L.K. | -936              | 944 | -937                 | 946  | -937              | 951  | -940                 | 954  | -950              | 967  | -962                 | 979         |
|                   |      | ZS 28             |     |                      |      | ZS 29             |      |                      |      | ZS 30             |      |                      |             |
|                   |      | min               | max | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max         |
| P6                | P.K. | -1012             | 918 | -938                 | 887  | -1032             | 942  | -936                 | 885  | -1047             | 958  | -936                 | 884         |
|                   | L.K. | -966              | 983 | -980                 | 1003 | -980              | 1001 | -999                 | 1022 | -993              | 1019 | -1025                | <b>1044</b> |
|                   |      | ZS 31             |     |                      |      | ZS 32             |      |                      |      | ZS 33             |      |                      |             |
|                   |      | min               | max | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max         |
| P6                | P.K. | -1026             | 938 | -932                 | 884  | -1009             | 914  | -936                 | 880  | -994              | 908  | -936                 | 884         |
|                   | L.K. | -983              | 989 | -999                 | 1005 | -974              | 966  | -1009                | 975  | -973              | 952  | -977                 | 959         |
|                   |      | ZS 34             |     |                      |      | ZS 35             |      |                      |      | ZS 36             |      |                      |             |
|                   |      | min               | max | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max         |
| P6                | P.K. | -983              | 904 | -936                 | 883  | -975              | 900  | -937                 | 881  | -966              | 899  | -937                 | 882         |
|                   | L.K. | -971              | 944 | -972                 | -949 | -965              | 933  | -967                 | 935  | -964              | 928  | -965                 | 926         |
|                   |      | ZS 37             |     |                      |      | ZS 38             |      |                      |      | ZS 39             |      |                      |             |
|                   |      | min               | max | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max         |
| P6                | P.K. | -962              | 895 | -937                 | 882  | -958              | 893  | -939                 | 885  | -954              | 892  | -939                 | 886         |
|                   | L.K. | -962              | 921 | -960                 | 920  | -960              | 918  | -958                 | 915  | -961              | 915  | -957                 | 912         |
|                   |      | ZS 40             |     |                      |      | ZS 41             |      |                      |      | ZS 42             |      |                      |             |
|                   |      | min               | max | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max         |
| P6                | P.K. | -952              | 891 | -939                 | 886  | -951              | 891  | -939                 | 886  | -946              | 889  | -939                 | 886         |
|                   | L.K. | -955              | 915 | -956                 | 910  | -951              | 914  | -956                 | 909  | -953              | 905  | -952                 | 906         |
|                   |      | ZS 43             |     |                      |      | ZS 44             |      |                      |      | ZS 45             |      |                      |             |
|                   |      | min               | max | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max         |
| P6                | P.K. | -945              | 887 | -940                 | 886  | -943              | 886  | -941                 | 888  | -942              | 884  | -940                 | 888         |
|                   | L.K. | -953              | 905 | -949                 | 903  | -953              | 902  | -949                 | 900  | -950              | 899  | -947                 | 898         |
|                   |      | ZS 46             |     |                      |      | ZS 47             |      |                      |      | ZS 48             |      |                      |             |
|                   |      | min               | max | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max         |
| P6                | P.K. | -940              | 884 | -940                 | 887  | -940              | 884  | -940                 | 887  | -940              | 884  | -938                 | 885         |
|                   | L.K. | -948              | 897 | -945                 | 894  | -947              | 896  | -944                 | 890  | -944              | 895  | -942                 | 889         |
|                   |      | ZS 49             |     |                      |      | ZS 50             |      |                      |      | ZS 51             |      |                      |             |
|                   |      | min               | max | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max         |
| P6                | P.K. | -938              | 885 | -939                 | 884  | -938              | 882  | -935                 | 884  | -936              | 883  | -934                 | 882         |
|                   | L.K. | -942              | 890 | -940                 | 888  | -938              | 887  | -935                 | 886  | -934              | 882  | -933                 | 881         |
|                   |      | ZS 52             |     |                      |      |                   |      |                      |      |                   |      |                      |             |
|                   |      | min               | max | min                  | max  |                   |      |                      |      |                   |      |                      |             |
| P6                | P.K. | -934              | 882 | -934                 | 881  |                   |      |                      |      |                   |      |                      |             |
|                   | L.K. | -933              | 880 | -933                 | 880  |                   |      |                      |      |                   |      |                      |             |

Pro vyhodnocení napětí je nutné stanovit maximální tahové a tlakové namáhání v kolejnici na mostě. Z analýzy plyne, že maximálních hodnot normálových sil v kolejnici, a tedy i napětí, je dosaženo v levé (vnější) koleji v kombinacích obsahujících ZS 21 a ZS 30. Níže jsou podrobně vykresleny průběhy normálových sil v zatěžovacích stavech, které obsahuje rozhodující kombinace.

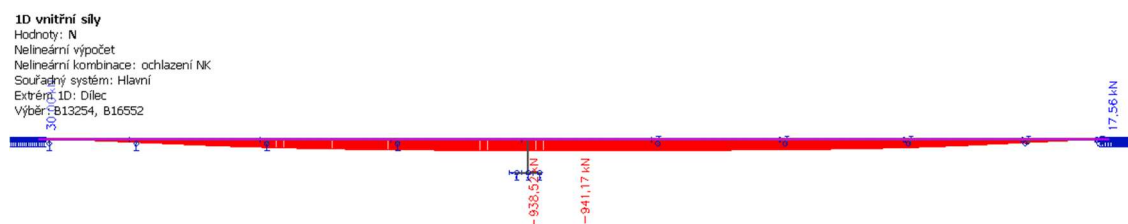
Největší tlakové namáhání ZS 21 – doprava pouze na levé koleji



obr. 41 Normálová síla od svislého zatížení ZS21

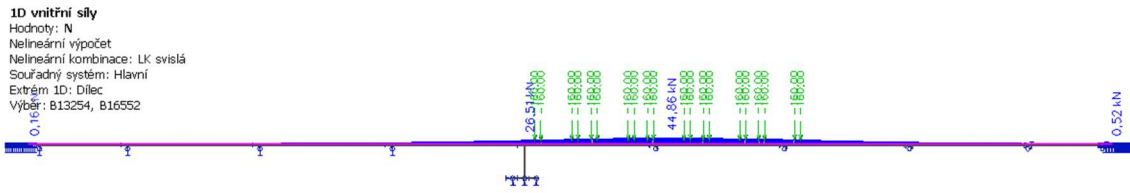


obr. 42 Normálová síla od vodorovného zatížení ZS21

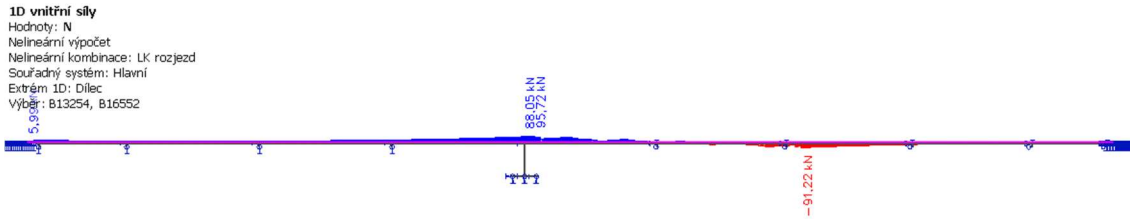


obr. 43 Normálová síla od ochlazení nosné konstrukce

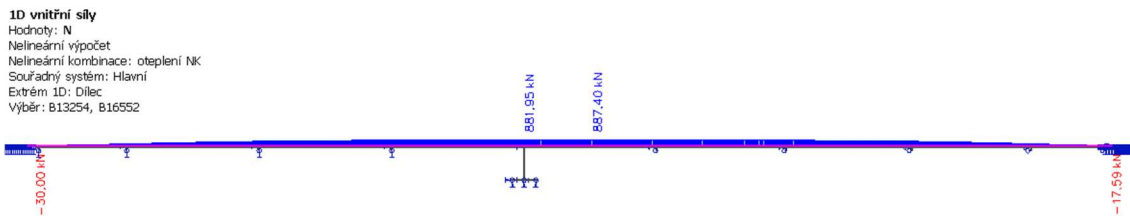
Největší tahové namáhání ZS 30 – doprava pouze na levé koleji



obr. 44 Normálová síla od svislého zatížení v levé koleji ZS30



obr. 45 Normálová síla od vodorovných sil v levé koleji ZS30



obr. 46 Normálová síla v levé koleji od oteplení nosné konstrukce

### 6.10.2 Model 2 – bezstyková kolej

V následující tabulce jsou uvedeny výsledné normálové síly v nejvíce namáhaných průřezech. Jsou to průřezy nad opěrami a průřez nad podporou č.6. Teplotní účinky byly vypočteny na modelu s nezátíženou kolejí, do výpočtu byla zahrnuta pouze změna teploty nosné konstrukce. Účinky dopravy byly vypočteny na modelu s interakčními parametry zatížené koleje v přetížené oblasti.

tab. 6 Výsledky numerického modelu 2

| Posuzovaný průřez |      | ZS 1              |      |                      |      | ZS 2              |      |                      |      | ZS 3              |      |                      |      |
|-------------------|------|-------------------|------|----------------------|------|-------------------|------|----------------------|------|-------------------|------|----------------------|------|
|                   |      | teplota + doprava |      | teplota + doprava LK |      | teplota + doprava |      | teplota + doprava LK |      | teplota + doprava |      | teplota + doprava LK |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -798              | 805  | -779                 | 791  | -870              | 923  | -864                 | 825  | -967              | 976  | -942                 | 951  |
|                   | L.K. | -811              | 818  | -821                 | 828  | -897              | 933  | -902                 | 928  | -978              | 989  | -988                 | 999  |
| P6                | P.K. | -752              | 722  | -749                 | 720  | -763              | 739  | -771                 | 744  | -787              | 753  | -783                 | 750  |
|                   | L.K. | -741              | 711  | -743                 | 713  | -768              | 729  | -750                 | 721  | -775              | 741  | -777                 | 733  |
| O2                | P.K. | -782              | 792  | -781                 | 790  | -826              | 835  | -814                 | 837  | -866              | 876  | -864                 | 873  |
|                   | L.K. | -772              | 781  | -771                 | 780  | -819              | 830  | -808                 | 826  | -854              | 862  | -852                 | 861  |
|                   |      | ZS 4              |      |                      |      | ZS 5              |      |                      |      | ZS 6              |      |                      |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -1080             | 1085 | -990                 | 998  | -1157             | 1167 | -1057                | 1068 | -1174             | 1197 | -1102                | 1128 |
|                   | L.K. | -1077             | 1092 | -1017                | 1108 | -1168             | 1181 | -1189                | 1204 | -1179             | 1205 | -1196                | 1121 |
| P6                | P.K. | -794              | 756  | -789                 | 759  | -807              | 760  | -800                 | 765  | -812              | 769  | -808                 | 768  |
|                   | L.K. | -786              | 760  | -788                 | 748  | -795              | 773  | -797                 | 764  | -801              | 770  | -801                 | 766  |
| O2                | P.K. | -891              | 900  | -899                 | 911  | -925              | 935  | -921                 | 931  | -923              | 955  | -938                 | 941  |
|                   | L.K. | -884              | 897  | -875                 | 893  | -911              | 920  | -908                 | 917  | -910              | 946  | -924                 | 935  |
|                   |      | ZS 7              |      |                      |      | ZS 8              |      |                      |      | ZS 9              |      |                      |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -1202             | 1230 | -1149                | 1176 | -1255             | 1285 | -1178                | 1208 | -1303             | 1329 | -1207                | 1240 |
|                   | L.K. | -1207             | 1236 | -1203                | 1233 | -1258             | 1285 | -1232                | 1265 | -1310             | 1334 | -1261                | 1297 |
| P6                | P.K. | -819              | 781  | -813                 | 774  | -821              | 785  | -819                 | 786  | -828              | 788  | -822                 | 789  |
|                   | L.K. | -806              | 768  | -808                 | 769  | -810              | 771  | -810                 | 773  | -814              | 774  | -815                 | 776  |
| O2                | P.K. | -922              | 982  | -958                 | 976  | -940              | 993  | -970                 | 985  | -967              | 1010 | -976                 | 996  |
|                   | L.K. | -908              | 967  | -944                 | 961  | -931              | 978  | -958                 | 972  | -968              | 991  | -963                 | 979  |
|                   |      | ZS 10             |      |                      |      | ZS 11             |      |                      |      | ZS 12             |      |                      |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -1356             | 1388 | -1237                | 1273 | -1342             | 1376 | -1229                | 1262 | -1333             | 1362 | -1222                | 1252 |
|                   | L.K. | -1359             | 1390 | -1329                | 1359 | -1351             | 1373 | -1309                | 1337 | -1335             | 1364 | -1290                | 1319 |
| P6                | P.K. | -836              | 795  | -825                 | 785  | -845              | 802  | -830                 | 790  | -857              | 815  | -838                 | 796  |
|                   | L.K. | -822              | 782  | -822                 | 783  | -831              | 796  | -835                 | 891  | -843              | 801  | -842                 | 801  |
| O2                | P.K. | -999              | 1019 | -985                 | 1006 | -1004             | 1024 | -986                 | 1005 | -1008             | 1028 | -985                 | 1005 |
|                   | L.K. | -984              | 1003 | -970                 | 990  | -987              | 1008 | -971                 | 990  | -993              | 1012 | -971                 | 990  |

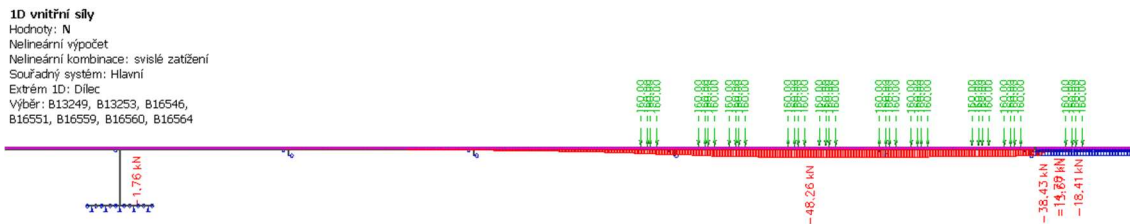
| Posuzovaný průřez |      | ZS 13             |      |                      |      | ZS 14             |      |                      |      | ZS 15             |      |                      |      |
|-------------------|------|-------------------|------|----------------------|------|-------------------|------|----------------------|------|-------------------|------|----------------------|------|
|                   |      | teplota + doprava |      | teplota + doprava LK |      | teplota + doprava |      | teplota + doprava LK |      | teplota + doprava |      | teplota + doprava LK |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -1274             | 1300 | -1162                | 1197 | -1212             | 1240 | -1099                | 1135 | -1150             | 1177 | -1039                | 1065 |
|                   | L.K. | -1271             | 1305 | -1230                | 1374 | -1217             | 1246 | -1169                | 1435 | -1152             | 1179 | -1106                | 1134 |
| P6                | P.K. | -866              | 827  | -846                 | 799  | -872              | 833  | -850                 | 803  | -886              | 841  | -855                 | 810  |
|                   | L.K. | -859              | 809  | -851                 | 812  | -867              | 816  | -865                 | 822  | -871              | 827  | -875                 | 831  |
| O2                | P.K. | -986              | 1004 | -958                 | 984  | -962              | 981  | -924                 | 948  | -945              | 964  | -912                 | 930  |
|                   | L.K. | -970              | 985  | -955                 | 960  | -948              | 971  | -919                 | 927  | -930              | 948  | -901                 | 918  |
|                   |      | ZS 16             |      |                      |      | ZS 17             |      |                      |      | ZS 18             |      |                      |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -1097             | 1220 | -1095                | 1013 | -1058             | 1082 | -954                 | 978  | -1027             | 1046 | -923                 | 944  |
|                   | L.K. | -1101             | 1224 | -1060                | 1095 | -1061             | 1085 | -1015                | 1038 | -1029             | 1049 | -983                 | 1004 |
| P6                | P.K. | -889              | 842  | -852                 | 808  | -893              | 849  | -849                 | 804  | -898              | 855  | -837                 | 799  |
|                   | L.K. | -875              | 831  | -885                 | 836  | -879              | 835  | -888                 | 845  | -882              | 841  | -895                 | 856  |
| O2                | P.K. | -929              | 947  | -889                 | 910  | -911              | 928  | -875                 | 892  | -907              | 915  | -867                 | 880  |
|                   | L.K. | -914              | 928  | -879                 | 900  | -897              | 914  | -866                 | 882  | -884              | 901  | -862                 | 865  |
|                   |      | ZS 19             |      |                      |      | ZS 20             |      |                      |      | ZS 21             |      |                      |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -996              | 1010 | -891                 | 910  | -956              | 972  | -861                 | 877  | -942              | 955  | -849                 | 865  |
|                   | L.K. | -1000             | 1013 | -951                 | 970  | -961              | 977  | -918                 | 935  | -945              | 966  | -904                 | 923  |
| P6                | P.K. | -903              | 858  | -830                 | 789  | -909              | 864  | -826                 | 782  | -890              | 834  | -819                 | 787  |
|                   | L.K. | -888              | 847  | -903                 | 866  | -893              | 853  | -919                 | 879  | -863              | 830  | -869                 | 859  |
| O2                | P.K. | -895              | 903  | -856                 | 863  | -881              | 896  | -839                 | 853  | -881              | 895  | -837                 | 850  |
|                   | L.K. | -876              | 892  | -847                 | 852  | -868              | 883  | -834                 | 848  | -868              | 883  | -834                 | 848  |
|                   |      | ZS 22             |      |                      |      | ZS 23             |      |                      |      | ZS 24             |      |                      |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -928              | 931  | -838                 | 852  | -911              | 922  | -828                 | 840  | -909              | 911  | -826                 | 836  |
|                   | L.K. | -937              | 959  | -890                 | 907  | -920              | 936  | -875                 | 891  | -912              | 927  | -867                 | 881  |
| P6                | P.K. | -871              | 799  | -811                 | 793  | -852              | 774  | -806                 | 800  | -844              | 774  | -806                 | 778  |
|                   | L.K. | -829              | 812  | -818                 | 840  | -805              | 796  | -775                 | 825  | -861              | 790  | -771                 | 802  |
| O2                | P.K. | -884              | 892  | -833                 | 848  | -885              | 892  | -832                 | 844  | -889              | 893  | -833                 | 844  |
|                   | L.K. | -868              | 884  | -832                 | 848  | -867              | 884  | -831                 | 848  | -870              | 894  | -833                 | 858  |
|                   |      | ZS 25             |      |                      |      | ZS 26             |      |                      |      | ZS 27             |      |                      |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -897              | 905  | -821                 | 832  | -893              | 899  | -818                 | 832  | -887              | 894  | -817                 | 830  |
|                   | L.K. | -906              | 923  | -859                 | 877  | -902              | 919  | -852                 | 872  | -897              | 914  | -847                 | 867  |
| P6                | P.K. | -838              | 744  | -805                 | 767  | -866              | 765  | -804                 | 767  | -893              | 780  | -803                 | 768  |
|                   | L.K. | -913              | 787  | -768                 | 788  | -865              | 769  | -790                 | 813  | -813              | 842  | -824                 | 856  |
| O2                | P.K. | -895              | 897  | -834                 | 844  | -904              | 899  | -835                 | 846  | -909              | 904  | -837                 | 846  |
|                   | L.K. | -872              | 894  | -837                 | 858  | -876              | 900  | -841                 | 869  | -879              | 909  | -846                 | 873  |

| Posuzovaný průřez |      | ZS 28             |      |                      |      | ZS 29             |      |                      |      | ZS 30             |      |                      |      |
|-------------------|------|-------------------|------|----------------------|------|-------------------|------|----------------------|------|-------------------|------|----------------------|------|
|                   |      | teplota + doprava |      | teplota + doprava LK |      | teplota + doprava |      | teplota + doprava LK |      | teplota + doprava |      | teplota + doprava LK |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -880              | 890  | -815                 | 829  | -878              | 885  | -813                 | 829  | -876              | 881  | -814                 | 830  |
|                   | L.K. | -893              | 911  | -840                 | 865  | -887              | 907  | -837                 | 861  | -885              | 905  | -838                 | 860  |
| P6                | P.K. | -915              | 806  | -803                 | 768  | -935              | 830  | -804                 | 769  | -915              | 820  | -808                 | 772  |
|                   | L.K. | -832              | 855  | -856                 | 889  | -846              | 871  | -877                 | 902  | -843              | 860  | -875                 | 885  |
| O2                | P.K. | -917              | 908  | -838                 | 848  | -931              | 915  | -842                 | 850  | -954              | 929  | -853                 | 862  |
|                   | L.K. | -886              | 920  | -854                 | 886  | -890              | 930  | -860                 | 896  | -906              | 946  | -876                 | 911  |
|                   |      | ZS 31             |      |                      |      | ZS 32             |      |                      |      | ZS 33             |      |                      |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -872              | 880  | -816                 | 830  | -870              | 878  | -817                 | 831  | -872              | 883  | -820                 | 838  |
|                   | L.K. | -884              | 901  | -839                 | 859  | -882              | 899  | -839                 | 857  | -888              | 901  | -842                 | 860  |
| P6                | P.K. | -901              | 816  | -810                 | 773  | -896              | 813  | -814                 | 774  | -887              | 808  | -815                 | 774  |
|                   | L.K. | -840              | 842  | -873                 | 863  | -838              | 839  | -871                 | 849  | -835              | 830  | -862                 | 836  |
| O2                | P.K. | -966              | 951  | -864                 | 870  | -977              | 963  | -873                 | 887  | -1003             | 1000 | -896                 | 913  |
|                   | L.K. | -918              | 968  | -889                 | 922  | -931              | 987  | -900                 | 934  | -957              | 1013 | -928                 | 969  |
|                   |      | ZS 34             |      |                      |      | ZS 35             |      |                      |      | ZS 36             |      |                      |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -875              | 886  | -823                 | 845  | -879              | 888  | -832                 | 852  | -890              | 902  | -851                 | 865  |
|                   | L.K. | -892              | 905  | -847                 | 869  | -895              | 909  | -851                 | 874  | -905              | 926  | -866                 | 892  |
| P6                | P.K. | -875              | 805  | -818                 | 776  | -865              | 801  | -818                 | 778  | -855              | 798  | -815                 | 776  |
|                   | L.K. | -832              | 818  | -840                 | 822  | -831              | 809  | -831                 | 811  | -827              | 801  | -824                 | 906  |
| O2                | P.K. | -1036             | 1033 | -923                 | 939  | -1062             | 1059 | -942                 | 964  | -1110             | 1104 | -986                 | 999  |
|                   | L.K. | -980              | 1043 | -949                 | 1005 | -1009             | 1059 | -973                 | 1041 | -1053             | 1104 | -1017                | 1090 |
|                   |      | ZS 37             |      |                      |      | ZS 38             |      |                      |      | ZS 39             |      |                      |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -898              | 915  | -863                 | 877  | -909              | 923  | -871                 | 896  | -919              | 935  | -878                 | 904  |
|                   | L.K. | -916              | 934  | -879                 | 907  | -928              | 946  | -891                 | 919  | -943              | 952  | -900                 | 932  |
| P6                | P.K. | -844              | 788  | -812                 | 774  | -837              | 785  | -810                 | 771  | -840              | 775  | -807                 | 769  |
|                   | L.K. | -823              | 790  | -818                 | 793  | -816              | 785  | -811                 | 782  | -812              | 780  | -809                 | 776  |
| O2                | P.K. | -1158             | 1142 | -1031                | 1033 | -1207             | 1205 | -1062                | 1069 | -1231             | 1215 | -1081                | 1081 |
|                   | L.K. | -1096             | 1175 | -1061                | 1137 | -1140             | 1242 | -1103                | 1185 | -1193             | 1287 | -1143                | 1234 |
|                   |      | ZS 40             |      |                      |      | ZS 41             |      |                      |      | ZS 42             |      |                      |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -931              | 947  | -893                 | 921  | -939              | 955  | -906                 | 934  | -951              | 969  | -922                 | 950  |
|                   | L.K. | -951              | 972  | -915                 | 955  | -959              | 979  | -927                 | 957  | -974              | 997  | -941                 | 981  |
| P6                | P.K. | -829              | 773  | -801                 | 765  | -818              | 772  | -799                 | 762  | -810              | 763  | -766                 | 756  |
|                   | L.K. | -806              | 772  | -804                 | 764  | -803              | 769  | -797                 | 766  | -799              | 763  | -764                 | 763  |
| O2                | P.K. | -1368             | 1256 | -1195                | 1102 | -1292             | 1276 | -1117                | 1142 | -1348             | 1347 | -1160                | 1189 |
|                   | L.K. | -1225             | 1354 | -1198                | 1279 | -1271             | 1394 | -1244                | 1340 | -1340             | 1488 | -1296                | 1401 |

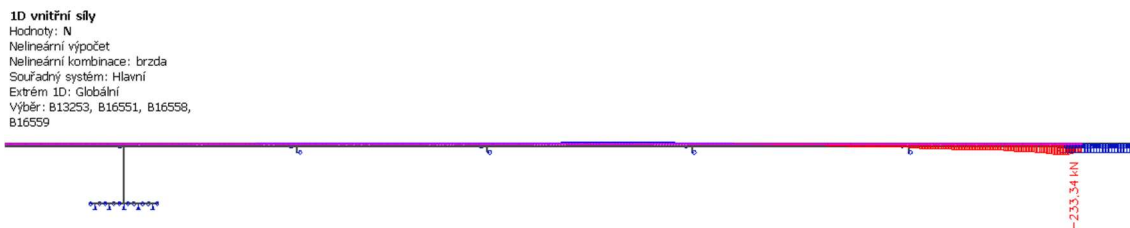
| Posuzovaný průřez |      | ZS 43             |      |                      |      | ZS 44             |             |                      |      | ZS 45             |      |                      |      |
|-------------------|------|-------------------|------|----------------------|------|-------------------|-------------|----------------------|------|-------------------|------|----------------------|------|
|                   |      | teplota + doprava |      | teplota + doprava LK |      | teplota + doprava |             | teplota + doprava LK |      | teplota + doprava |      | teplota + doprava LK |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max         | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -970              | 989  | -942                 | 970  | -980              | 1000        | -955                 | 986  | -974              | 996  | -954                 | 985  |
|                   | L.K. | -992              | 1014 | -964                 | 995  | -1003             | 1025        | -978                 | 1011 | -997              | 1021 | -977                 | 1010 |
| P6                | P.K. | -804              | 760  | -759                 | 752  | -792              | 751         | -779                 | 744  | -786              | 714  | -775                 | 741  |
|                   | L.K. | -790              | 755  | -741                 | 752  | -779              | 744         | -773                 | 742  | -772              | 707  | -769                 | 737  |
| O2                | P.K. | -1390             | 1366 | -1196                | 1219 | <b>-1412</b>      | 1383        | -1230                | 1250 | -1403             | 1371 | -1230                | 1249 |
|                   | L.K. | -1370             | 1502 | -1352                | 1450 | -1389             | <b>1524</b> | -1372                | 1475 | -1383             | 1516 | -1372                | 1470 |
|                   |      | ZS 46             |      |                      |      | ZS 47             |             |                      |      | ZS 48             |      |                      |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max         | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -968              | 990  | -947                 | 977  | -956              | 980         | -943                 | 973  | -943              | 966  | -930                 | 958  |
|                   | L.K. | -987              | 1015 | -971                 | 1005 | -979              | 1005        | -965                 | 997  | -965              | 988  | -957                 | 981  |
| P6                | P.K. | -783              | 726  | -774                 | 737  | -776              | 738         | -769                 | 735  | -776              | 730  | -769                 | 732  |
|                   | L.K. | -768              | 721  | -766                 | 735  | -765              | 730         | -762                 | 729  | -764              | 732  | -759                 | 734  |
| O2                | P.K. | -1382             | 1346 | -1201                | 1235 | -1343             | 1317        | -1192                | 1212 | -1280             | 1293 | -1161                | 1189 |
|                   | L.K. | -1350             | 1479 | -1358                | 1460 | -1338             | 1452        | -1340                | 1425 | -1288             | 1392 | -1247                | 1375 |
|                   |      | ZS 49             |      |                      |      | ZS 50             |             |                      |      | ZS 51             |      |                      |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  | min               | max         | min                  | max  | min               | max  | min                  | max  |
| O1                | P.K. | -931              | 951  | -922                 | 946  | -867              | 890         | -872                 | 885  | -795              | 822  | -803                 | 821  |
|                   | L.K. | -952              | 975  | -944                 | 970  | -894              | 913         | -858                 | 908  | -834              | 849  | -803                 | 842  |
| P6                | P.K. | -771              | 725  | -767                 | 732  | -771              | 732         | -771                 | 734  | -775              | 735  | -775                 | 739  |
|                   | L.K. | -760              | 734  | -759                 | 725  | -762              | 734         | -760                 | 726  | -765              | 732  | -763                 | 731  |
| O2                | P.K. | -1234             | 1228 | -1136                | 1158 | -1095             | 1137        | -1029                | 1042 | -991              | 1046 | -918                 | 901  |
|                   | L.K. | -1234             | 1313 | -1191                | 1314 | -1094             | 1169        | -1084                | 1167 | -987              | 1020 | -972                 | 987  |
|                   |      | ZS 52             |      |                      |      |                   |             |                      |      |                   |      |                      |      |
|                   |      | min               | max  | min                  | max  |                   |             |                      |      |                   |      |                      |      |
| O1                | P.K. | -759              | 769  | -754                 | 768  |                   |             |                      |      |                   |      |                      |      |
|                   | L.K. | -774              | 786  | -769                 | 785  |                   |             |                      |      |                   |      |                      |      |
| P6                | P.K. | -776              | 740  | -776                 | 740  |                   |             |                      |      |                   |      |                      |      |
|                   | L.K. | -767              | 731  | -764                 | 731  |                   |             |                      |      |                   |      |                      |      |
| O2                | P.K. | -864              | 865  | -824                 | 831  |                   |             |                      |      |                   |      |                      |      |
|                   | L.K. | -854              | 880  | -868                 | 886  |                   |             |                      |      |                   |      |                      |      |

Pro vyhodnocení napětí je nutné stanovit maximální tahové a tlakové namáhání v kolejnici na mostě, případně za opěrou. Z analýzy plyne, že maximálních kladných hodnot normálových sil v kolejnici je dosaženo v levé (vnější) koleji (LK) v kombinacích obsahující polohu pohyblivého zatížení ZS 44. Největších záporných, tlakových, hodnot je dosaženo v pravé koleji (PK) taktéž při ZS 44. Níže jsou podrobně vykresleny průběhy normálových sil v zatěžovacích stavech, které jsou obsaženy v rozhodující kombinaci.

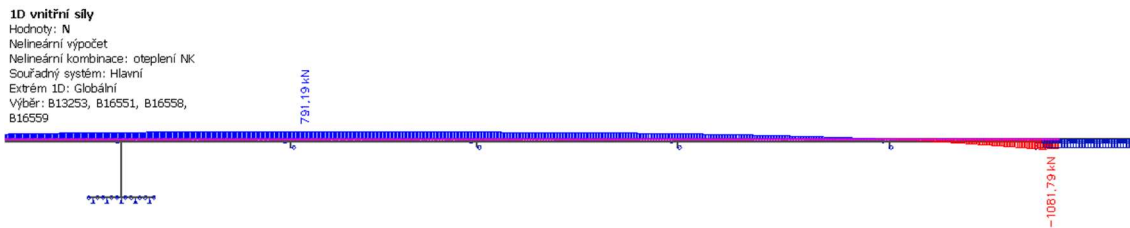
Největší tlakové namáhání ZS 44 – zatížení dopravou na obou kolejkách – PK



obr. 47 Normálová síla v pravé koleji od svislého zatížení ZS44



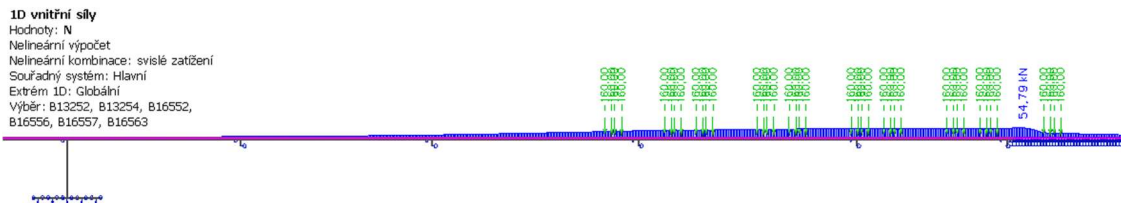
obr. 48 Normálová síla v pravé koleji od vodorovných sil ZS44



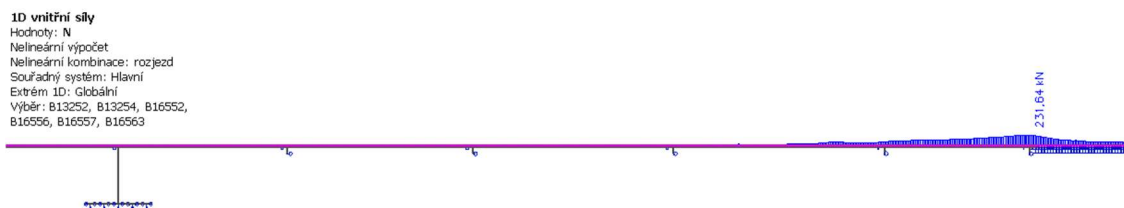
obr. 49 Normálová síla v pravé koleji od oteplení nosné konstrukce



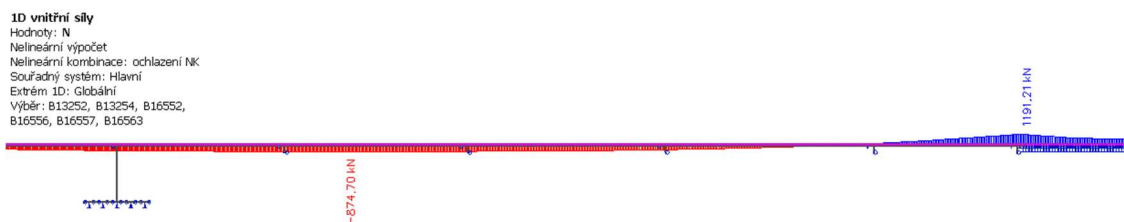
Největší tahové namáhání ZS 44 – zatížení na obou kolejích – LK



obr. 50 Normálová síla v levé koleji od svislého zatížení ZS44



obr. 51 Normálová síla v levé koleji od vodorovných sil ZS44



obr. 52 Normálová síla v levé koleji od ochlazení nosné konstrukce

## 7 Posouzení

### 7.1 Model 1 – stávající stav

Výpočet napětí byl proveden metodou mezních přírůstků dle ČSN EN 1991-2 [4] a MVL 150 [6]. Standardní limity mezních přírůstků jsou odvozeny pro kolejnici 60E1. Pro kolejnici S49 žádná kritéria neexistují, avšak na základě znalosti odvození limitních hodnot pro kolejnici 60E1, je možné odvodit kritéria pro kolejnici S49. Odvození limitních přírůstků je možno nalézt například v článku Freystein, H.: Interaktion Gleis/Brücke – Stand der Technik und Beispiele [10]. V článku je odvození pro kolejnici 60E1 z oceli UIC900A o pevnosti  $f_u = 900$  MPa.

Odvození pro tahové namáhání vychází z maximálního povoleného namáhání kolejnice o velikosti 470 MPa, definovaného jako 90 % smluvní meze kluzu. Od této hodnoty se poté odečítá namáhání od změny teploty kolejnice o 50 °C (rozdíl minimální teploty od upínací teploty), napětí v kolejnici vznikající od lokálního ohybu vlivem zatížení dopravou, vlastní pnutí v kolejnici a předpokládané ohybové namáhání kolejnice vlivem průhybu nosné konstrukce od svislých zatížení. Ohybové namáhání od průhybu nosné konstrukce není třeba odečítat, pokud numerická analýza účinky svislých zatížení zohledňuje.

|  |         |
|--|---------|
| Výchozí dovolené namáhání kolejnice:   | 470 MPa |
| Namáhání změnou teploty:               | 120 MPa |
| Napětí od lokálního namáhání dopravou: | 158 MPa |
| Vlastní pnutí v kolejnici:             | 80 MPa  |
| Namáhání od průhybu nosné konstrukce   | 20 MPa  |

$$470 - 120 - 158 - 80 - 20 = 92 \text{ MPa}$$

$$470 - 120 - 158 - 80 = 112 \text{ MPa}$$

Výsledné přídatné tahové napětí je tedy 92 MPa, v případě zohlednění svislých zatížení 112 MPa.

Výpočet pro kolejnici S49 se v tomto případě bude lišit v napětí od lokálního ohybu, protože uvedené odvození je pro nápravu LM 71, tedy 250 kN. Na mostě pro metro je dle ČSN EN 1991-2/Z1 (4) maximální nápravová síla 160 kN. Dalším rozdílem je jiný průřezový modul kolejnice. Kolejnice 60E1 má průřezový modul 334 cm<sup>3</sup>, kolejnice S49 má průřezový modul 240 cm<sup>3</sup>. Napětí od lokálního ohybu vlivem zatížení dopravou lze pak upravit:

$$158 \cdot \frac{160}{250} \cdot \frac{334}{240} = 140 \text{ MPa}$$

Maximální přídatné tahové namáhání je pak:

$$470 - 120 - 140 - 80 - 20 = 110 \text{ MPa, resp. } 130 \text{ v případě zohlednění svislých zatížení.}$$



Přídavné tlakové napětí podle principu odvození nezávisí na svislém zatížení ani přímo na typu kolejnice, proto je možné vycházet z hodnoty -72 MPa, resp. -92 MPa při zohlednění účinků svislých zatížení, která se uvažuje v kolejovém loži bez pražcových kotev nebo jiných opatření pro zvýšení příčné tuhosti.

Velmi důležité je poznamenat, že tyto odvozené limitní hodnoty platí pro posouzení bezстыkové koleje. Tedy koleje, které je bráněno v jakékoli dilataci. To však neplatí pro model 1, kde jsou umístěna kolejová dilatační zařízení a je umožněn pohyb kolejnice umístěné na mostním objektu.

Plocha jedné kolejnice S49

$$A_{S49} = 6292 \text{ mm}^2$$

### 7.1.1 Posouzení napětí v kolejnici

Maximální tlaková síla vzniká v LK při ZS21 v průřezu nad pilířem P6, kde je umístěno pevné ložisko.

Posouzení tlakového napětí se započítáním svislých zatížení:

$$\sigma_{min} = \frac{1,0 \cdot N_{teplota} + 1,3 \cdot N_{ZS21,svislé} + 1,3 \cdot N_{ZS21,vodorovné}}{2 \cdot A_{S49}} = \frac{-1048000}{2 \cdot 6292} = -83,3 \text{ MPa}$$

$$|-83,3 \text{ MPa}| \leq |-92 \text{ MPa}|$$

**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 90 %**

Posouzení tlakového napětí bez započítání svislých zatížení:

$$\sigma_{min} = \frac{1,0 \cdot N_{teplota} + 1,3 \cdot N_{ZS21,vodorovné}}{2 \cdot A_{S4}} = \frac{-1055600}{2 \cdot 6292} = -83,9 \text{ MPa}$$

$$|-83,9 \text{ MPa}| \leq |-72 \text{ MPa}|$$

**NEVYHOVUJE, PRŮŘEZ JE VYUŽIT NA 116 %**

Posouzení interakce kolej-most obecně vychází z metodiky dovolených namáhání (např. UIC 774-3R [9]), kde nejsou použity dílčí součinitele. Výsledné využití by tak v případě použití pouze charakteristických hodnot bylo nižší. Použití dílčích součinitelů se doporučuje dle MVL 150 [6].

Posouzení tlakového napětí bez započítání svislých zatížení a dílčích součinitelů:

$$\sigma_{min} = \frac{N_{teplota} + N_{ZS21,vodorovné}}{2 \cdot A_{S49}} = \frac{-983\,500}{2 \cdot 6292} = -78,1 \text{ MPa}$$

$$|-78,1 \text{ MPa}| \leq |-72 \text{ MPa}|$$

**NEVYHOVUJE, PRŮŘEZ JE VYUŽIT NA 108 %**



Maximální tahová síla vzniká v LK při ZS 30 v průřezu nad pilířem P6, kde je umístěno pevné ložisko.

Posouzení tahového napětí se započítáním svislých zatížení:

$$\sigma_{min} = \frac{1,0 \cdot N_{teplota} + 1,3 \cdot N_{ZS30,svisté} + 1,3 \cdot N_{ZS30,vodorovné}}{2 \cdot A_{S49}} = \frac{1\,044\,000}{2 \cdot 6292} = 83,0 \text{ MPa}$$

$$|83,0 \text{ MPa}| \leq |110 \text{ MPa}|$$

**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 75 %**

Posouzení tahového napětí bez započítání svislých napětí:

$$\sigma_{min} = \frac{1,0 \cdot N_{teplota} + 1,3 \cdot N_{ZS30,vodorovné}}{2 \cdot A_{S49}} = \frac{1\,009\,500}{2 \cdot 6292} = 80,2 \text{ MPa}$$

$$|80,2 \text{ MPa}| \leq |130 \text{ MPa}|$$

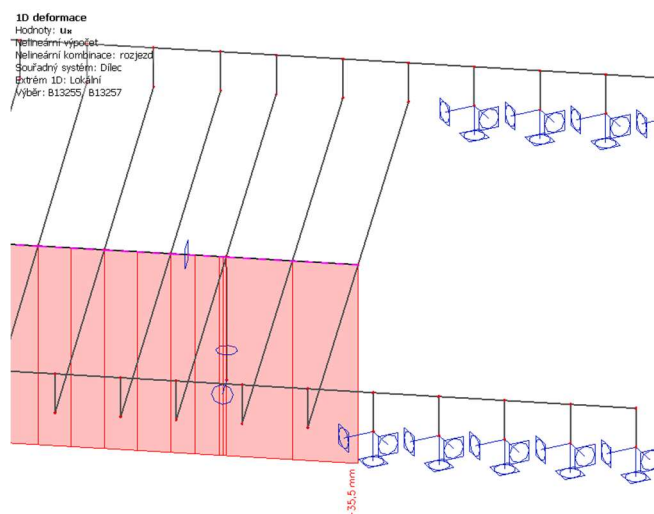
**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 62 %**

## 7.1.2 Posouzení limitních deformací

### 1. Podélný posun vlivem brzdných sil

Při rozjezdu a brždění dochází k posunu celé konstrukce mostu. Dle ČSN EN 1991-2 jsou tyto posuny omezeny v závislosti na uspořádání železničního svršku. Pro most s kolejovým dilatačním zařízením na obou koncích je maximální povolená hodnota podélného posunu od brzdných nebo rozjezdových sil 30 mm. Pro most s kolejovým dilatačním zařízením na obou koncích mostu a s přerušným kolejovým ložem je možné dovolit i posuny větší než 30 mm.

Maximálního podélného posunu čela hlavního nosníku bylo dosaženo v ZS43 nad opěrou O1.



obr. 53 Posun čela hlavního nosníku od vodorovných sil ZS43

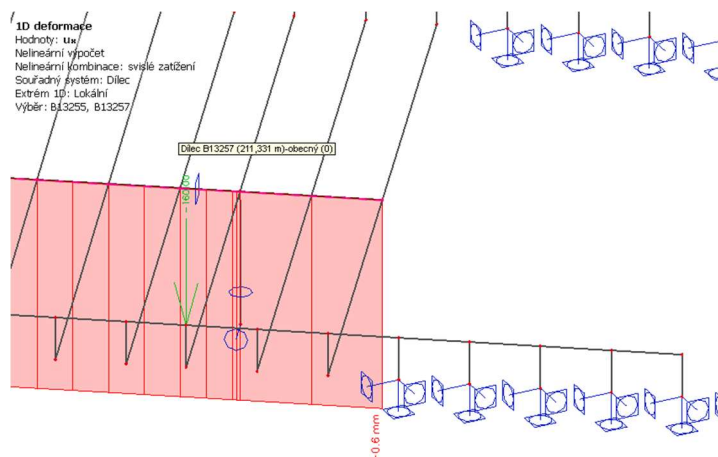
Maximální podélný posun od rozjezdových sil:  $\delta_B = 35,5 \text{ mm}$

Protože je most vybaven kolejovým dilatačním zařízením na obou koncích mostu a zároveň je přerušeno kolejové lože, je možné dovolit i pohyby větší než 30 mm.

**VYHOVUJE**

## 2. Podélný posun vlivem svislých zatížení

Dle ČSN EN 1991-2 nesmí být podélný posun horního povrchu při deformaci od svislých zatížení dopravou  $\delta_H$  větší než 8 mm.



obr. 54 Posun čela hlavního nosníku od svislého zatížení ZS43

Maximální podélný posun čela hlavního nosníku  $\delta_H$  byl dosažen v ZS43 nad opěrou O2.

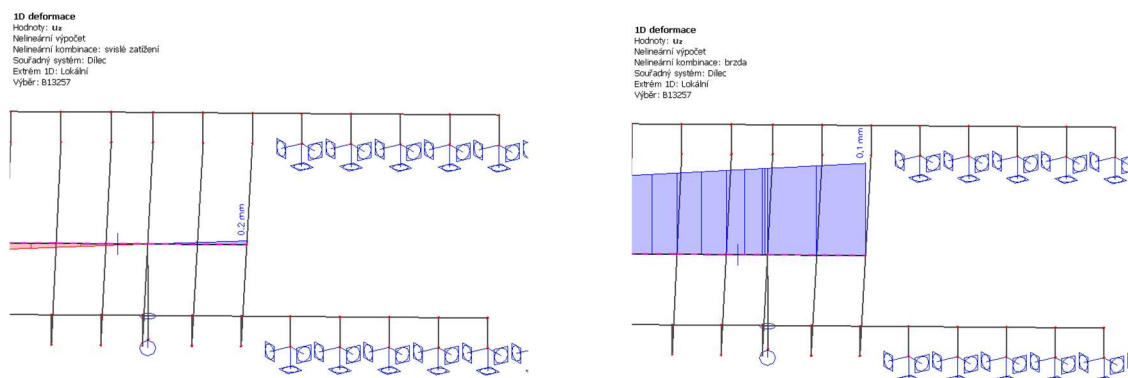
Maximální podélný posun od svislého zatížení:  $\delta_H = 0,6 \text{ mm} \leq 8 \text{ mm}$

**VYHOVUJE**

## 3. Svislé posunutí

Dle ČSN EN 1991-2 nesmí svislé posunutí horního povrchu nosné konstrukce  $\delta_v$  vzhledem k přilehlé konstrukci (opěře nebo jiné konstrukci) překročit hodnotu 3 mm.

Maximálního posunu  $\delta_v$  bylo dosaženo nad opěrou O2 v ZS38 – ZS44 při kombinaci svislých a vodorovných zatížení dopravou.



obr. 55 Nadzvednutí čela hlavního nosníku od svislého zatížení (vlevo) a vodorovného zatížení (vpravo) ZS44

Maximální svislé posunutí:  $\delta_v = 0,2 + 0,1 \text{ mm} \leq 3 \text{ mm}$

**VYHOVUJE**

## 7.2 Model 2 – bezstyková kolej

### 7.2.1 Posouzení napětí v kolejnici

Maximální tlaková síla vzniká v PK při ZS44 v průřezu nad opěrou O2.

Posouzení tlakového napětí se započítáním svislých zatížení:

$$\sigma_{min} = \frac{1,0 \cdot N_{teplota} + 1,3 \cdot N_{ZS44,svislé} + 1,3 \cdot N_{ZS44,vodorovné}}{2 \cdot A_{S49}} = \frac{-1412000}{2 \cdot 6292} = -112 \text{ MPa}$$

$$|-112 \text{ MPa}| \leq |-92 \text{ MPa}|$$

**NEVYHOVUJE, PRŮŘEZ JE VYUŽIT NA 122 %**

Posouzení tlakového napětí bez započítání svislých zatížení:

$$\sigma_{min} = \frac{1,0 \cdot N_{teplota} + 1,3 \cdot N_{ZS44,vodorovné}}{2 \cdot A_{S49}} = \frac{-1360000}{2 \cdot 6292} = -108 \text{ MPa}$$

$$|-108 \text{ MPa}| \leq |-72 \text{ MPa}|$$

**NEVYHOVUJE, PRŮŘEZ JE VYUŽIT NA 150 %**

Posouzení interakce kolej-most obecně vychází z metodiky dovolených namáhání (viz např. UIC 774-3R), kde nejsou použity dílčí součinitele. Výsledné využití by tak v případě použití pouze charakteristických hodnot bylo nižší. Použití dílčích součinitelů se doporučuje dle MVL 150.

Posouzení tlakového napětí bez započítání dílčích součinitelů:

$$\sigma_{min} = \frac{N_{teplota} + N_{ZS44,svislé} + N_{ZS44,vodorovné}}{2 \cdot A_{S49}} = \frac{-1353500}{2 \cdot 6292} = -107,5 \text{ MPa}$$

$$|-107,5 \text{ MPa}| \leq |-92 \text{ MPa}|$$

**NEVYHOVUJE, PRŮŘEZ JE VYUŽIT NA 117 %**

Posouzení tlakového napětí bez započítání svislých zatížení a dílčích součinitelů:

$$\sigma_{min} = \frac{N_{teplota} + N_{ZS44,vodorovné}}{2 \cdot A_{S49}} = \frac{-1315000}{2 \cdot 6292} = -104,5 \text{ MPa}$$

$$|-104,5 \text{ MPa}| \leq |-72 \text{ MPa}|$$

**NEVYHOVUJE, PRŮŘEZ JE VYUŽIT NA 145 %**



Maximální tahová síla vzniká v LK při ZS44 v průřezu nad opěrou O2.

Posouzení tahového napětí se započítáním svislých zatížení:

$$\sigma_{min} = \frac{1,0 \cdot N_{teplota} + 1,3 \cdot N_{ZS44,svislé} + 1,3 \cdot N_{ZS44,vodorovné}}{2 \cdot A_{S49}} = \frac{1524000}{2 \cdot 6292} = 121 \text{ MPa}$$

$$|121 \text{ MPa}| \leq |110 \text{ MPa}|$$

**NEVYHOVUJE, PRŮŘEZ JE VYUŽIT NA 110 %**

Posouzení tahového napětí bez započítání svislých napětí:

$$\sigma_{min} = \frac{1,0 \cdot N_{teplota} + 1,3 \cdot N_{ZS21,vodorovné}}{2 \cdot A_{S49}} = \frac{1469000}{2 \cdot 6292} = 117 \text{ MPa}$$

$$|117 \text{ MPa}| \leq |130 \text{ MPa}|$$

**VYHOVUJE S VYUŽITÍM 90 %**

Posouzení tahového napětí se započítáním svislých zatížení, bez dílčích součinitelů:

$$\sigma_{min} = \frac{1,0 \cdot N_{teplota} + N_{ZS44,svislé} + N_{ZS44,vodorovné}}{2 \cdot A_{S49}} = \frac{1478000}{2 \cdot 6292} = 117 \text{ MPa}$$

$$|117 \text{ MPa}| \leq |110 \text{ MPa}|$$

**NEVYHOVUJE, PRŮŘEZ JE VYUŽIT NA 107 %**

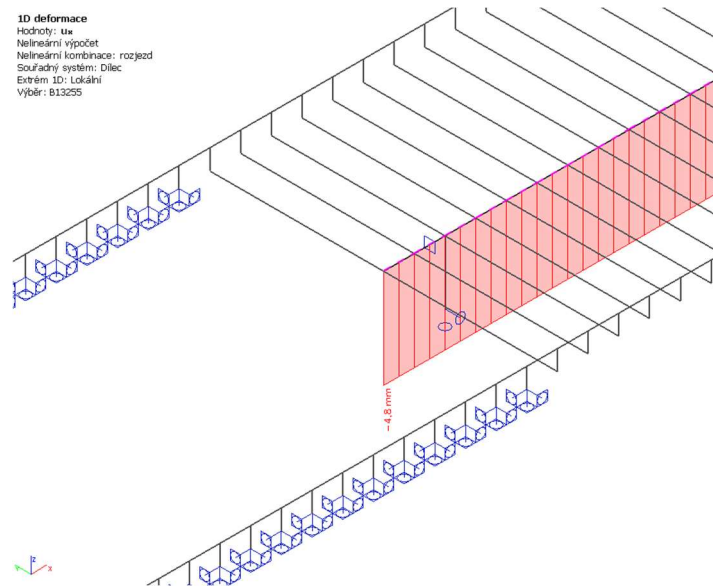
## 7.2.2 Posouzení limitních deformací

### 1. Podélný posun vlivem brzdících sil

Dle ČSN EN 1991-2 při rozjezdu nebo brzdění nesmí relativní podélný posun mezi koncem nosné konstrukce a přilehlou opěrou nebo relativní podélné posunutí mezi dvěma následujícími nosnými konstrukcemi  $\delta_B$  překročit hodnotu 5 mm.

Maximálního podélného posunu  $\delta_B$  bylo dosaženo nad opěrou O1 v ZS21 – ZS25.





obr. 56 Posun čela hlavního nosníku od vodorovných sil ZS25

Maximální podélný posun od vodorovného zatížení:

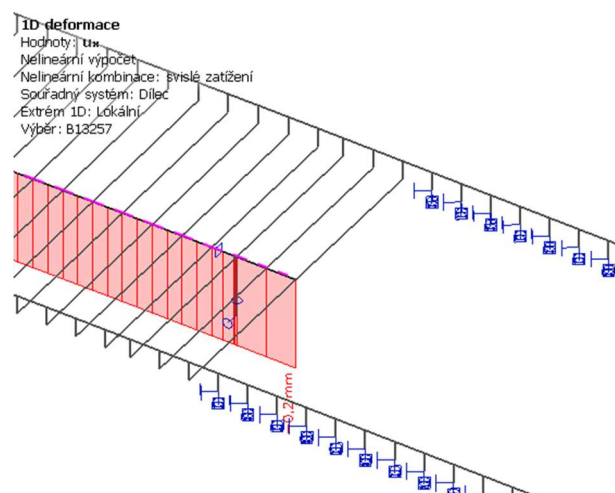
$$\delta_B = 4,8 \text{ mm} \leq 5 \text{ mm}$$

**VYHOVUJE**

## 2. Podélný posun vlivem svislých zatížení

Dle ČSN EN 1991-2 nesmí být podélný posun horního povrchu při deformaci od svislých zatížení dopravou  $\delta_H$  větší než 8 mm.

Maximální podélný posun čela hlavního nosníku  $\delta_H$  byl dosažen v ZS45 nad opěrou O2.



obr. 57 Posun čela hlavního nosníku od svislých sil ZS45

Maximální podélný posun od svislého zatížení:

$$\delta_H = 0,2 \text{ mm} \leq 8 \text{ mm}$$

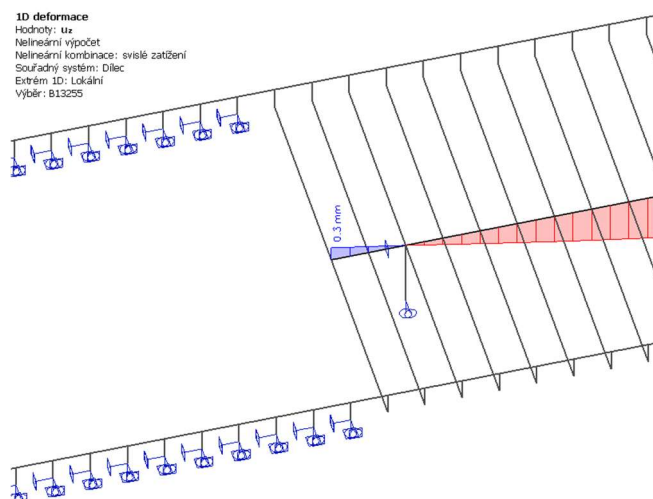
**VYHOVUJE**



### 3. Svislé posunutí

Dle ČSN EN 1991-2 nesmí svislé posunutí horního povrchu nosné konstrukce  $\delta_v$  vzhledem k přilehlé konstrukci (opěře nebo jiné konstrukci) překročit hodnotu 3 mm.

Maximálního posunu  $\delta_v$  bylo dosaženo nad opěrou O2 v ZS5-ZS8 při svislém zatížení dopravou.



obr. 58 Nadzvednutí čela hlavního nosníku od svislého zatížení ZS5

Maximální svislý posun zatížení dopravou:  $\delta_H = 0,3 \text{ mm} \leq 8 \text{ mm}$

**VYHOVUJE**

## 8 Závěr

Výsledkem této práce je prověření chování bezстыkové koleje pro stávající stav mostu, kdy jsou na každém konci mostního objektu umístěna kolejová dilatační zařízení. Dalším krokem je posouzení bezстыkové koleje pro stav, kdy jsou vyjmuta kolejová dilatační zařízení a kolejnice jsou svařeny do jednoho dlouhého pásu.

V modelu stávajícího stavu nevyhověla kolej na posouzení přírůstku tlakového napětí v průřezu nad pilířem P6. Odvozené limitní přírůstky napětí, se kterými byly porovnány výsledky, platí pro bezстыkovou kolej, které je bráněno v dilataci. To neodpovídá modelu 1, protože za mostním objektem se nachází kolejová dilatační zařízení umožňující koleji dilatovat. V kapitole 7 současně není zmíněna změna teploty kolejnice. Pokud by byla změna teploty kolejnice zohledněna, výsledky by byly výrazně příznivější. Využití kolejnice překračuje limitní hodnotu pouze o 8 %. Dilatující kolejnice by při započítání změny teploty kolejnice velmi pravděpodobně vyhověla. Dalším vlivem na výsledky je nejistota při volbě interakčních parametrů, protože pro upevnění typu K s tuhou svěrkou ŽS 3 neexistují žádné normové ani experimentální hodnoty. Pokud tedy byla zvolena nadměrná tuhost, projevovalo se to na značném využití interakce kolej-most.

Pro model bezстыkové koleje dochází k významnému namáhání nad oběma opěrami. V těchto místech také vzniká v koleji největší normálová síla, tedy i největší napětí. Hodnoty tohoto napětí, jak tahového, tak tlakového, převyšují únosnost kolejnice S49. Docházelo by tak k nadměrnému namáhání a to až 1,5x převyšujícímu únosnost kolejnic. Hrozilo by vybočení nebo lom kolejnice. Přestože mezní deformace vyhověly, nelze v současném stavu zřídit bezстыkovou kolej vedoucí přes mostní objekt. Řešením by mohla být výměna upevnění kolejnice za svěrky s nižší držečností. Význam by mohlo mít i monitorování skutečné teploty mostní konstrukce. Most chrání zateplený tubus, který brání přímému slunečnímu svitu a nadměrnému ohřívání konstrukce. Zároveň i při nízkých venkovních teplotách nedochází k tak velkému ochlazení konstrukce a s tím spojeným tahovým namáháním koleje. Rozdíl skutečných teplot oproti teplotám doporučeným normou by musel být poměrně významný. Upevnění koleje na mostě se z většiny nachází v plastické oblasti, kde nedochází k nárůstu namáhání, pouze k nárůstu deformace. Malá změna teploty by tak na výsledek neměla vliv.

Pokračováním práce by mohlo být monitorování skutečné teploty a skutečné dilatace mostního objektu a následný přepočít pro stávající svěrky, případně svěrky s nižší držečností ke snížení interakce most – kolej.



## Seznam použité literatury

- [1] Metrostav, Metroprojekt. *Projektová dokumentace: Provozní úsek trasy B, Most pro metro*. Praha, 1987
- [2] Krejčířiková, H. *Železniční stavby 1 / 1. část*. Praha: vydalo České vysoké učení technické v Praze, květen 2017.
- [3] ČDS3/2. *Bezстыková kolej*. Praha: České dráhy, 2002.
- [4] ČSN EN 1991-2 (736203). *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 2: Zatížení mostů dopravou*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [5] ČSN EN 1991-1-5 (730035). *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-5: Obecná zatížení – Zatížení teplotou*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [6] SŽDC, s.o. *MVL 150: Kombinovaná odezva mostu a koleje*. Praha :2016.
- [7] ZAND, J. van't, MORAAL, J., *BALLAST RESISTANCE UNDER THREE DIMENSIONAL LOADING*, Delft University of Technology, DELFT
- [8] STANČÍK, V., RYJÁČEK, P. *Steel bridge in interaction with modern slab track fastening systems under various vertical load levels*. In *BESTInfra2017*. Bristol, Velká Británie: IOP Publishing Ltd, 2017
- [9] UIC Code 774 - 3 R, 2nd edition, *Track/bridge interaction, Recommendations for calculations*. Paříž: UIC, 2001.
- [10] FREYSTEIN, H. *Interaktion Gleis/Brücke - Stand der Technik und Beispiele*. Stahlbau. 2010, 79, stránky 220-231.



## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| obr. 1 Podélný řez a půdorys mostu [1] .....  | 10 |
| obr. 2 Pevné ložisko HLK N 13 000 [1] .....   | 12 |
| obr. 3 Posuvné ložisko HLK NGe 13 000 [1].....  | 12 |
| obr. 4 Upevnění K se svěrkou ŽS 3, montovaný spoj .....   | 13 |
| obr. 5 Bezpražcové upevnění .....   | 13 |
| obr. 6 Kolejové dilatační zařízení .....  | 14 |
| obr. 7 Izolovaný styk.....  | 14 |
| obr. 8 Dilatace pojistných úhelníků .....   | 14 |
| obr. 9 Korýtka pro kabely .....   | 15 |
| obr. 10 Průběh vnitřní normálové síly v bezstykové koleji [6].....  | 17 |
| obr. 11 Schéma průběhu normálové síly $N_x$ v kolejnici v důsledku spolupůsobení<br>mostní konstrukce a koleje [6] .....      | 18 |
| obr. 12 Příklad stanovení tuhosti spodní stavby [6].....  | 20 |
| obr. 13 Schéma deformace nosné konstrukce nad opěrou v důsledku zatížení mostu [6]<br>.....                                   | 21 |
| obr. 14 Schéma deformace nosné konstrukce nad opěrou v důsledku zatížení mostu [6]<br>.....                                   | 21 |
| obr. 15 Zatěžovací schéma [4] .....   | 23 |
| obr. 16 Charakteristické hodnoty maximální teploty vzduchu ve stínu [5].....  | 25 |
| obr. 17 Charakteristické hodnoty minimální teploty vzduchu ve stínu [5].....  | 25 |
| obr. 18 Vztah mezi minimální/maximální teplotou vzduchu ve stínu a<br>minimální/maximální rovnoměrnou teplotou mostu [5]..... | 26 |
| obr. 19 Schéma výpočetního modelu [4] .....   | 27 |
| obr. 20 Detail modelu nad opěrou O1.....  | 28 |
| obr. 21 Popis částí výpočetního modelu .....  | 28 |
| obr. 22 Průřez koleje S49 použitý ve výpočetním modelu .....  | 29 |
| obr. 23 Průřez nosné konstrukce použitý ve výpočetním modelu .....  | 29 |
| Obr. 24 Průřez dřívku pilíře použitý ve výpočetním modelu .....   | 30 |
| obr. 25 Interakční parametry DFF 300 s použitou pružnou svěrkou skl 15 v závislosti<br>na svislém přitížení [8].....          | 31 |
| obr. 26 Nelineární funkce podélného odporu ve šterkovém loži - vlevo nezatížená kolej,<br>vpravo zatížená kolej .....         | 32 |
| obr. 27 Nelineární funkce podélných odporů pro bezpražcové upevnění - vlevo<br>nezatížená kolej, vpravo zatížená kolej .....  | 33 |
| obr. 28 Nelineární funkce podélné tuhosti pro ložisko .....   | 33 |
| obr. 29 Detail spodní stavby pilíře P6.....   | 34 |
| obr. 30 Model spodní stavby v programu GEO5 Skupina pilot .....   | 34 |
| obr. 31 Výsledné posuny a pootočení základového roštu.....  | 35 |
| obr. 32 Pohyb zatížení po konstrukci.....   | 36 |
| obr. 33 Svislé zatížení dopravou - ZS 12 .....  | 36 |
| obr. 34 Vodorovné zatížení dopravou ve směru staničení - ZS12 .....   | 36 |
| obr. 35 Vodorovné zatížení dopravou proti směru staničení - ZS12 .....  | 37 |
| obr. 36 Svislé zatížení dopravou v levé koleji - ZS12 .....   | 37 |
| obr. 37 Vodorovné zatížení dopravou v levé koleji ve směru staničení - ZS12 .....   | 38 |



|   |    |
|---|----|
| obr. 38 Vodorovné zatížení dopravou v levé koleji proti směru staničení - ZS12 .....                                | 38 |
| obr. 39 Zatížení rovnoměrnou změnou teploty - oteplení.....   | 39 |
| obr. 40 Zatížení rovnoměrnou změnou teploty - ochlazení .....   | 39 |
| obr. 41 Normálová síla od svislého zatížení ZS21 .....  | 42 |
| obr. 42 Normálová síla od vodorovného zatížení ZS21 .....   | 42 |
| obr. 43 Normálová síla od ochlazení nosné konstrukce .....  | 42 |
| obr. 44 Normálová síla od svislého zatížení v levé koleji ZS30.....   | 43 |
| obr. 45 Normálová síla od vodorovných sil v levé koleji ZS30 .....  | 43 |
| obr. 46 Normálová síla v levé koleji od oteplení nosné konstrukce .....   | 43 |
| obr. 47 Normálová síla v pravé koleji od svislého zatížení ZS44 .....   | 48 |
| obr. 48 Normálová síla v pravé koleji od vodorovných sil ZS44 .....   | 48 |
| obr. 49 Normálová síla v pravé koleji od oteplení nosné konstrukce.....   | 48 |
| obr. 50 Normálová síla v levé koleji od svislého zatížení ZS44.....   | 49 |
| obr. 51 Normálová síla v levé koleji od vodorovných sil ZS44 .....  | 49 |
| obr. 52 Normálová síla v levé koleji od ochlazení nosné konstrukce.....   | 49 |
| obr. 53 Posun čela hlavního nosníku od vodorovných sil ZS43.....  | 52 |
| obr. 54 Posun čela hlavního nosníku od svislého zatížení ZS43 .....   | 53 |
| obr. 55 Nadzvednutí čela hlavního nosníku od svislého zatížení (vlevo) a vodorovného<br>zatížení (vpravo) ZS44..... | 53 |
| obr. 56 Posun čela hlavního nosníku od vodorovných sil ZS25.....  | 56 |
| obr. 57 Posun čela hlavního nosníku od svislých sil ZS45.....   | 56 |
| obr. 58 Nadzvednutí čela hlavního nosníku od svislého zatížení ZS5 .....  | 57 |



## Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| tab. 1 Nezatížená kolej ve štěrkovém loži ..... | 31 |
| tab. 2 Zatížená kolej ve štěrkovém loži .....   | 31 |
| tab. 3 Nezatížená kolej - přímé upevnění.....   | 32 |
| tab. 4 Zatížená kolej - přímé upevnění.....     | 32 |
| tab. 5 Výsledky numerického modelu 1 .....      | 40 |
| tab. 6 Výsledky numerického modelu 2 .....      | 44 |



## Seznam příloh

Výkres 1 – Příčný řez nad podporou v poli

Výkres 2 – Příčný řez nad podporou v oblouku

Výkres 3 – Příčný řez v poli v přímé

Výkres 4 – Příčný řez v poli v oblouku

Výkres 5 – Podélný řez a půdorys 1

Výkres 6 – Podélný řez a půdorys 2

